



TITLE:

矮新星おおぐま座 E R のネガティブスーパーハンプの測光観測を通じての物理的構造の解明(  
Dissertation\_全文)

AUTHOR(S):

大島, 誠人

---

CITATION:

大島, 誠人. 矮新星おおぐま座 E R のネガティブスーパーハンプの測光観測を通じての物理的構造の解明. 京都大学, 2014, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2014-03-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18078>

RIGHT:

許諾条件により本文は2014-08-01に公開; 許諾条件により要旨は2014-06-23に公開

# 矮新星おおぐま座ERのネガティブスーパーハ ンプの測光観測を通じての物理的構造の解明

大島誠人

## Abstract

矮新星 ER UMa の 2011 年 1 月に起きたスーパーアウトバーストの最中に、当時スーパーアウトバースト中には存在が知られていなかった negative superhump の存在が確認された。その後、世界各地の観測者との協力により、2 年間にわたってこの天体の可視測光観測を行った。この観測期間を通じて、ER UMa には顕著な negative superhump が見られた。この観測データを元に、我々は “least absolute shrinkage and selection operator” (Lasso) と “phase dispersion minimization” (PDM) と呼ばれる解析手法を主に用い、negative superhump の時間的发展を追跡した。その結果、negative superhump の周期がスーパーアウトバーストから次のスーパーアウトバーストまでの間を通じて次第に減少するというトレンドを示し、その間にノーマルアウトバーストの開始時には negative superhump 周期の減少が生じるという一貫した系統的な変化を示すことが判明した。このような周期変化は、negative superhump の成因から円盤の半径の変化を間接的にとらえていた結果として解釈することが出来る。またこの解釈の元では、半径変化は SU UMa 型矮新星のメカニズムを説明付ける理論として知られている熱潮汐不安定性モデル (TTI model) で予言されるものと一致する。supercycle 中の normal outburst の増光スピードは supercycle の前半には速く、後半になると遅くなるという傾向がみられ、これは negative superhump を示すような系では円盤が公転軌道面上から傾いており、そのため伴星からの降着物質が円盤の外縁部ではなくより内側に蓄積することと関係があるのではないかと解釈できる。また、superoutburst のうちのいくつかは明らかに precursor としての normal outburst によって引き起こされて、そこから positive superhump が成長していく様子が顕著にうかがえ、TTI モデルによって説明づけされる SU UMa 型矮新星のスーパーアウトバーストのメカニズムによく合う。また、positive superhump と negative superhump はスーパーアウトバースト中には共存しており、アウトバーストが極大に達したのち 4-5 日は positive superhump が顕著であるがそれより後は negative superhump のプロファイルが強く現れはじめ、positive superhump は相対的に目立たなくなる。スーパーアウトバースト初期の positive superhump が強く見られる時期について、negative superhump の影響を差し引いたところ増光初期に stage A とよばれるまだ十分に発達していない、eccentricity が円盤外縁部に局在している時期の superhump が見られることが判明した。この stage A superhump は系の質量比を求めることに使うことができ、観測から得られた ER UMa の質量比は 0.100(15) となった。これは、この天体が一般的な激変星の進化経路から大きく外れていないことを示す。今回の発見は、円盤の傾きが激変星のような比較的シンプルな系でも引き起こされることを示唆する。この発見は、さまざまな系において存在する円盤

の傾きという現象の原因についての統合的な理解をしていく上で、大きな手がかりになると考えられる。



# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction I: 激変星と従来の描像</b>	<b>4</b>
1	矮新星とは	4
1.1	熱的不安定性について	6
1.2	矮新星のサブグループ	9
1.2.1	Z Cam 型矮新星	9
1.2.2	SU UMa 型矮新星	11
1.3	SU UMa 型矮新星	11
1.3.1	潮汐不安定性と superoutburst	11
1.3.2	WZ Sge 型矮新星と early superhump	13
2	連星系における進化	15
2.1	長期的な進化	15
2.2	激変星進化に対する新星爆発の影響	17
<b>2</b>	<b>Introduction II: 激変星の新しい描像</b>	<b>19</b>
3	従来の描像に対する問題点	19
3.1	1990 年代前半までの superhump 周期に関する見方	19
3.2	1993 年: Patterson et al. (1993a) による解釈	21
3.3	1995 年: $P_{\text{dot}} > 0$ の系の発見	21
3.4	2000 年代の動向	23
3.4.1	不連続な周期変化の発見	23
3.4.2	precursor と $P_{\text{dot}}$ の関係	24
3.4.3	superhump 周期変化の総括 (Kato et al., 2009)	25
4	superhump excess の問題について	28
4.1	Osaki(1985) での見積りについて	28
4.2	Hirose & Osaki (1990) での見積りについて	30
4.3	観測的な観点からの問題	31
5	pressure effect	32
5.1	嚆矢としての Lubow (1992a)、Hirose and Osaki (1993)	32

5.2	観測との比較 pressure effect 効果の精密化 . . . . .	38
5.3	pressure effect を考慮しない質量比 $q$ 見積り 手法 . . . . .	43
6	観測手法の発展 . . . . .	44
6.1	SDSS の果たした役割 . . . . .	44
6.2	Kepler による CV 観測 . . . . .	46
6.3	その他のサーベイ 観測 . . . . .	47
7	Negative Superhump . . . . .	48
7.1	negative superhump の発見 . . . . .	48
7.2	歳差角速度 . . . . .	49
7.3	励起機構の問題 . . . . .	52
7.4	SPH シミュレーションによるもの . . . . .	54
7.5	superoutburst 中に観測される例 . . . . .	54
7.6	BK Lyn と 激変星進化 . . . . .	54
8	近年の WZ Sge 型矮新星の理解についての進展 . . . . .	55
9	2013 年以降の Osaki, Kato による 論文 . . . . .	57
9.1	Osaki and Kato (2013a) . . . . .	57
9.1.1	対立仮説その 1 EMT model . . . . .	57
9.1.2	対立仮説その 2 Pure Thermal Instability Model . . . . .	58
9.1.3	V1504 Cyg の Kepler 衛星による 観測 . . . . .	59
9.1.4	EMT model への反論 . . . . .	62
9.1.5	Pure Thermal Instability Model への反論 . . . . .	63
9.1.6	negative superhump の周期発展 . . . . .	63
9.2	Osaki and Kato (2013b) . . . . .	65
9.3	Osaki and Kato (2014) . . . . .	66
9.4	Kato and Osaki (2013b) . . . . .	69
9.5	その後の Pdot survey paper について . . . . .	70
10	動機: tilt した円盤を持つ系から円盤の物理を知る . . . . .	73
<b>3</b>	<b>ER UMa における negative superhump の発見と 観測</b>	<b>75</b>
11	ER UMa 発見の歴史 . . . . .	75
12	2011–2012 年の superoutburst . . . . .	76
<b>4</b>	<b>観測結果と 議論</b>	<b>80</b>
13	長期的な光度変化 . . . . .	80
13.1	Supercycle 2011 S1 . . . . .	85
13.2	Supercycle 2011 S2 . . . . .	85
13.3	Supercycle 2011 S3 . . . . .	86
13.4	Supercycle 2012 S0 . . . . .	86

13.5	Supercycle 2012 S1 . . . . .	86
13.6	Supercycle 2012 S2 . . . . .	87
13.7	Supercycle 2012 S3 . . . . .	87
14	Normal Outburst における特徴 . . . . .	87
14.1	Normal Outburst の頻度 . . . . .	87
14.2	Normal Outburst における増光速度 . . . . .	88
15	Negative Superhump . . . . .	91
15.1	$O - C$ 解析 . . . . .	93
15.2	Lasso 解析 . . . . .	96
15.3	Negative Superhump の振幅 . . . . .	99
15.4	Negative Superhump の周期発展についての考察 . . . . .	100
16	Positive superhump . . . . .	100
16.1	Positive Superhump と Negative Superhump の共存とそれによる問題点 . . . . .	100
16.2	Negative Superhump の影響の除去とその結果 . . . . .	107
16.3	Negative Superhump から Positive Superhump への遷移 . . . . .	113
16.4	Positive superhump と Negative superhump の関係 . . . . .	114
17	連星進化の観点からの考察 . . . . .	115
18	結論 . . . . .	116
19	謝辞 . . . . .	117
A	観測リスト . . . . .	119
B	Negative Superhump の極大時刻リスト . . . . .	149
C	圧縮センシングについて . . . . .	185

# Chapter 1

## Introduction I: 激変星と従来の描像

### 1 矮新星とは

核融合によって輝いている恒星の中には、お互いの重力によって引かれまわりあっているものが存在し、連星と呼ばれる。このような連星系の中にはお互いの距離が非常に近く恒星自身の半径程度しか離れていないものもあり、このような系の場合は恒星が自分の重力圏である Roche lobe を満たしている場合がある。二つの星がまわりあった連星系の場合、片方のみが Roche lobe を満たしているものを半分離型連星、両方が Roche lobe を満たしているものを接触型連星と呼ぶ。激変星とは、白色矮星を主星、低温星を伴星に持つ連星系のうち、低温星が Roche lobe を満たしている半分離型連星をさす。多くの場合低温星は主系列星である。激変星の場合白色矮星が主星で低温星が伴星である。このうち、伴星の Roche lobe から溢れ出た物質は、連星系の重力ポテンシャルの稜にあたる L1 点から白色矮星へと向かって流れ込み、質量輸送が起きる (Lubow and Shu, 1975)。

この伴星から輸送された物質は、Figure 2 のように白色矮星の周囲を公転し、物質同士の相互作用によって運動エネルギーを交換し合いながら軌道を変化させていく。このプロセスを経ている間、角運動量の総和は一定であるため、物質の運動は L1 点での角運動量と等しい Kepler 速度をとる半径である  $r_{\text{circ}}$  (circularization radius) へと落ち着く。この半径は、L1 点で物質が放出されたときの固有角運動量と等しい角運動量でケプラー回転する半径となる。

このようにして物質が輸送されつづける場合、伴星からの降着流はすべて上記の半径付近に蓄積されることになる。そのため、この半径に降着した物質同士での粘性が発生し、これによって角運動量の輸送が生じる。その結果として、一部の物質は角運動量を失い、内側に落ち込む。また、一部の物質は角運動量を得て外側に広がる。このとき、ケプラー回転をしている物質は、速度

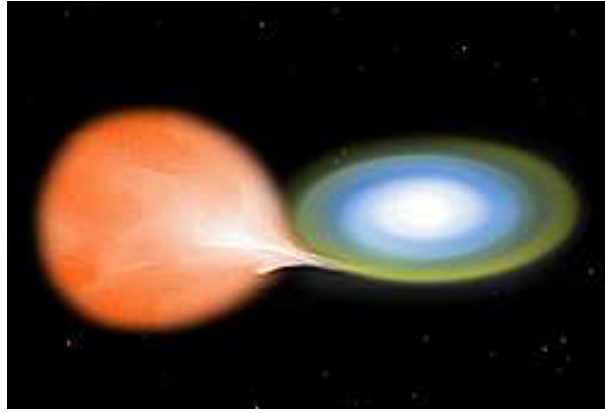


Figure 1: 激変星の想像図 (Wiki commons による。  
[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5d/Making\\_a\\_Nova.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5d/Making_a_Nova.jpg))。

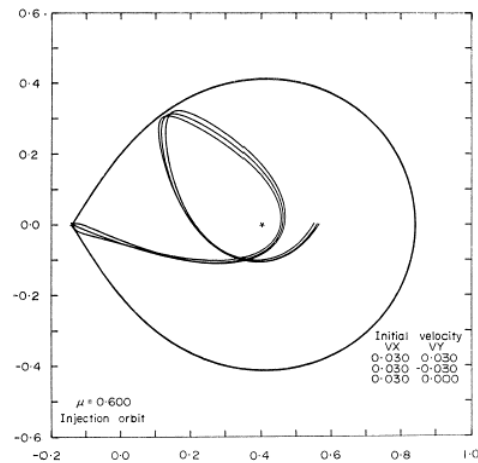


FIG. 4. Particle trajectories in the orbital plane corresponding to thermal evaporation from the inner Lagrangian point for a mass fraction of 0.6. The bounding curve represents the Roche equipotential through  $L_1$ . Note that the trajectories cross before reaching the region of hot spot formation, which is  $r_d = 0.10$  for this mass fraction.

Figure 2: L1 点からの物質の降着の様子。3本の軌道は初期速度の違いを示す。(Flannery (1975), Figure 4)

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (1)$$

で公転運動をしている。この時、物質の運動エネルギーは

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{2r} \propto \frac{1}{r} \quad (2)$$

で示される。このとき、ケプラー速度で運動している物質の角運動量  $L$  が半径  $r$  のときに

$$L = mrv = mr\sqrt{\frac{GM}{r}} \propto \sqrt{r} \quad (3)$$

と書き表わせる。そして物質は半径  $r_{\text{circ}}$  に局在することなく半径方向に広がり、disk が形成される。

## 1.1 熱的不安定性について

矮新星とは、激変星のうちの一グループで現在数百個が発見されている。このグループの天体は数日から数万日の間隔で数等級のアウトバーストを繰り返すことを特徴とする天体である (Figure 5)。このようにアウトバーストを繰り返すことを説明するメカニズムのひとつとして、熱的不安定モデルが提唱されてきた (Osaki, 1974)。矮新星の disk に蓄積した物質は粘性機構によって半径方向に輸送され、このとき粘性摩擦によって物質のエネルギーの一部は輻射として外へ放出される。円盤上で発生するエネルギー  $Q_+$  は主に上述の粘性によって生じるエネルギーであり、一方で失われるエネルギー  $Q_-$  は輻射によって失われるものである。この二つが平衡状態にあった  $\Sigma$  と  $\dot{M}$  の関係をグラフに表すとき、電氣的に中性な状態にある円盤と電離した状態にある円盤では異なった平衡曲線をもつため、実際にこの二つの関係をグラフにプロットすると Figure 3 のようになる。これは、電離した状態とそうでない状態で opacity が異なることに関係している。

disk におけるエネルギーの生成 ( $Q_+$ ) と輻射 ( $Q_-$ ) によるエネルギーの損失が釣り合っている熱的平衡曲線を描くと、Figure 3 のようになる。系の状態がこの曲線の上にある場合、粘性によって生成されるエネルギーと輻射によって失われるエネルギーが釣り合っていることを示す。そのため、系のある部分がここからずれた  $\Sigma$  と  $T$  をとる場合、その部分は曲線上の値をとるようにグラフ上を動く。

安定した状態の一例として、系の状態として温度と面密度が点 1 にあるときを考える。このとき、点 2 まで表面密度が増加した場合を考える。このとき、密度が増えた分それに応じて物質間の衝突が頻繁に起こるようになり粘性によるエネルギーの

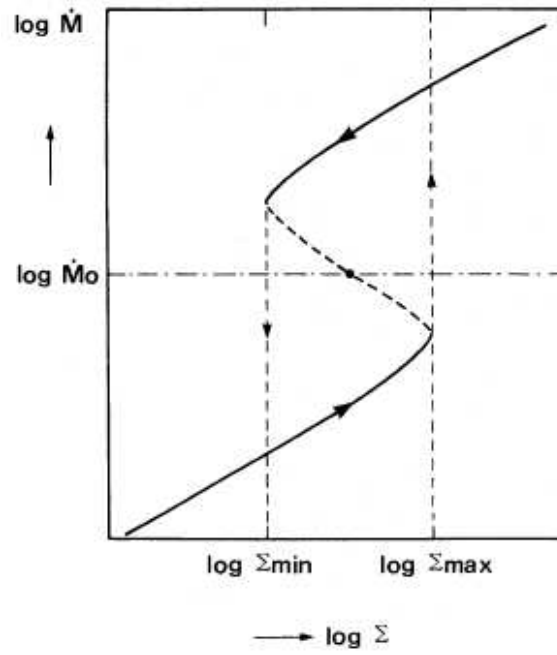


Figure 3: 円盤上における熱平衡曲線 (Osaki 1989, Figure 2)

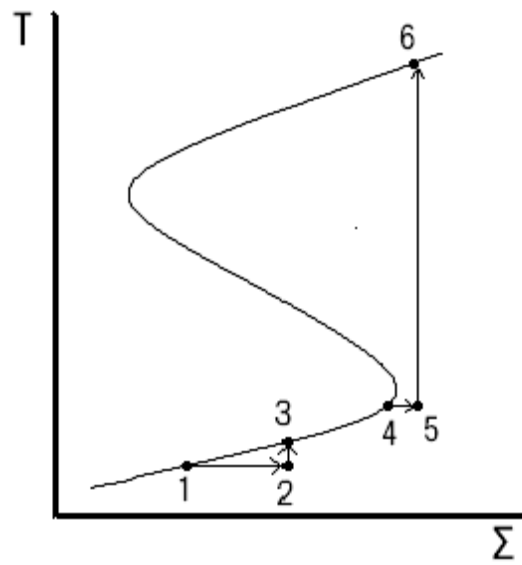


Figure 4: 円盤上における熱平衡曲線における矮新星増光のメカニズム。

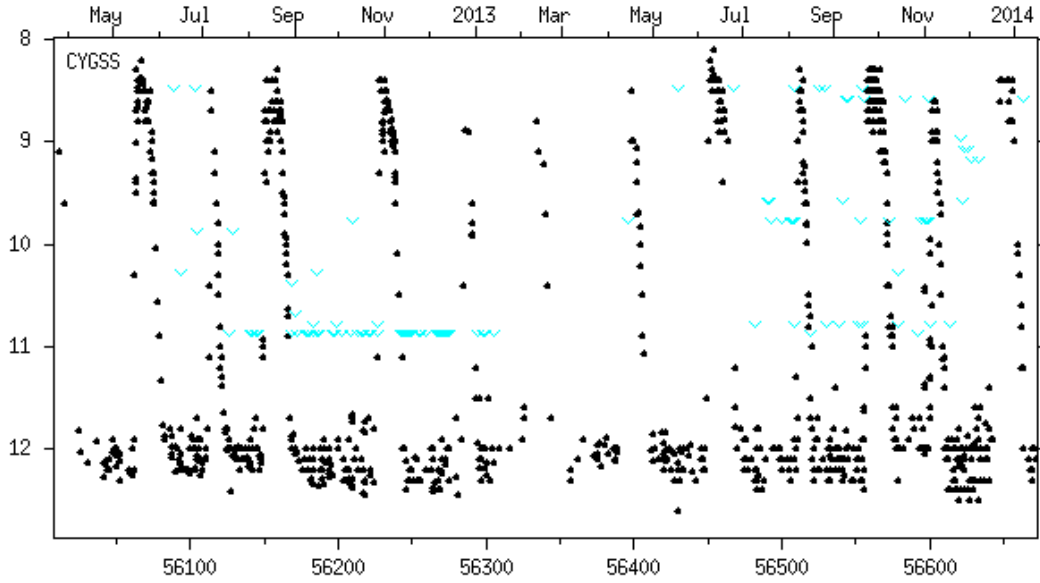


Figure 5: 矮新星 SS Cyg の光度曲線 (VSNET に寄せられた観測データによる)。

生成が増加する。結果、輻射によるエネルギーの損失も増加して点3まで動き、再び平衡に戻る。

しかし、一方で系の状態が点4にあった場合、事情が異なる。つまり、この状態にあるとき面密度が増加して点5に動いた場合、輻射の増加は点6まで動かないと平衡に達しない。

このような不安定性が矮新星のアウトバーストを引き起こす様子を Figure 4 に示す。Figure 4 の点 A から物質が降着していくあいだ、系は暗い状態として観測される。この粘性の変化は、円盤の粘性の変化に大きな関係がある。そのため、円盤上の粘性が一定の値をとる場合、円盤が安定な状態を保つためには  $Q_-$  と  $Q_+$  は等しい必要がある。そのため、円盤の面密度  $\Sigma$  と円盤上で生じる内側への質量輸送  $\dot{M}$  の関係は一意的に決定される。その一方、この関係は円盤上の粘性が異なる場合粘性によって生じる  $Q_+$  がより大きい値をとるため、同じように一意的に決定されるもののその関係はある面密度  $\Sigma$  に対して前述の場合よりは大きい  $\dot{M}$  が対応する。

しかし、降着が続くと安定した値をとれなくなる点 B に達する。ところが、面密度  $\Sigma$  がある値  $\Sigma_{\text{crit}}$  を越えると、円盤における粘性が増大する。そのため、面密度が  $\Sigma_{\text{crit}}$  になると円盤が安定な状態を保つために必要な  $\Sigma$  がそれまでに比べて大きくなるため  $\dot{M}$  が急激に増大する。このような粘性の増大は、円盤中に存在する水素の陰イオン ( $\text{H}^-$ ) の影響によるものだと考えられている。このとき B は上記のように不安定な平衡点なために物質がそれ以上降着すると温度が Figure 4 の C 点まで明る



くなり、下の光度曲線での B 点から C 点のような急激なアウトバーストとなって観測される。これを、矮新星アウトバーストと呼ぶ。観測的にはこれがアウトバーストの開始に相当するものだと考えられる。このようにしてアウトバーストの状態に達した円盤では、静穏時に比べて大きな  $\dot{M}$  を示す。この平衡曲線の上部の安定点に達したのちの系は、伴星からやってくる物質よりも粘性によって内側に輸送される物質のほうが多いため  $\Sigma$  はしだいに減少する。また、それとともに粘性によるエネルギーの輻射も低下するため温度が下がり、平衡曲線上をたどって減光する。そして、D 点まで下がると、B 点と同様の理由で  $\dot{M}$  が急激に低下し A 点まで急減光する。これがアウトバーストの終了に相当すると考えられる。のようなサイクルをリミットサイクルと呼び、矮新星のアウトバーストはこれによって繰り返されていると考えられている。このようなサイクルは Osaki (1974) によって提唱されたが、これがどのような不安定性によって引き起こされるかはまだわかっていなかった。その後、熱的不安定性がこれを引き起こすものとして提唱されるようになった (Hōshi, 1979)。このように、温度の小さな変化によって大きく質量輸送率が変化する現象のことを熱的不安定性と呼ぶ。こ伴星から disk への質量移動の大きさによって、系がこのサイクルを動く周期は異なる。そのため、矮新星のアウトバースト間隔は短いものの数日程度のものから長いものの数十年まで広い範囲に分布している。ただし、一般的には数十日程度のものが多い。

アウトバーストの原因を説明するもう一つの仮説として、伴星からの質量輸送率の変化によるものだとするものが存在する。これは、伴星から円盤に落ちてくる物質の量が何らかの理由によって増加するためにそれにともなうアウトバースト状態と静穏状態を繰り返すとするものである (Bath, 1973)。

矮新星にはいくつかのサブタイプがある。なお、以下の 2 種類に該当しない典型的な矮新星は SS Cyg 型矮新星と分類されている。

## 1.2 矮新星のサブグループ

### 1.2.1 Z Cam 型矮新星

前述の熱平衡曲線 (Figure 3) より、伴星からの質量輸送が一定の値 ( $\dot{M}_{\text{crit}}$ ) より大きい系では温度と面密度の関係はつねに上部の平衡状態をとる。

矮新星の中でも比較的質量移動率が高い系は、ときおり質量移動による矮新星のリミットサイクルが上部の平衡状態で停止し、一定光度を保つ状態 (standstill) をとることがある (Figure 6)。このような矮新星を Z Cam 型矮新星と呼ぶ。高い質量移動率のために、一般的に矮新星アウトバーストの間隔は短い。のちに述べる新星類似天体と矮新星との中間的天体と考えられている。

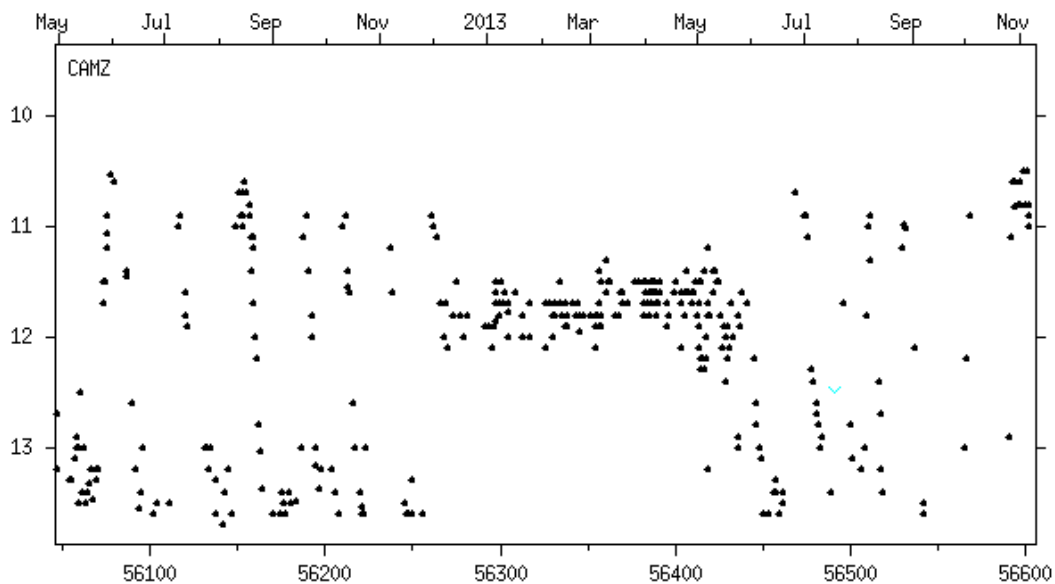


Figure 6: Z Cam 型矮新星の代表天体である、Z Cam の光度曲線 (VSNET によせられたデータによる)。中央の 2013 年 1 月から 5 月の間に見られるのが standstill。

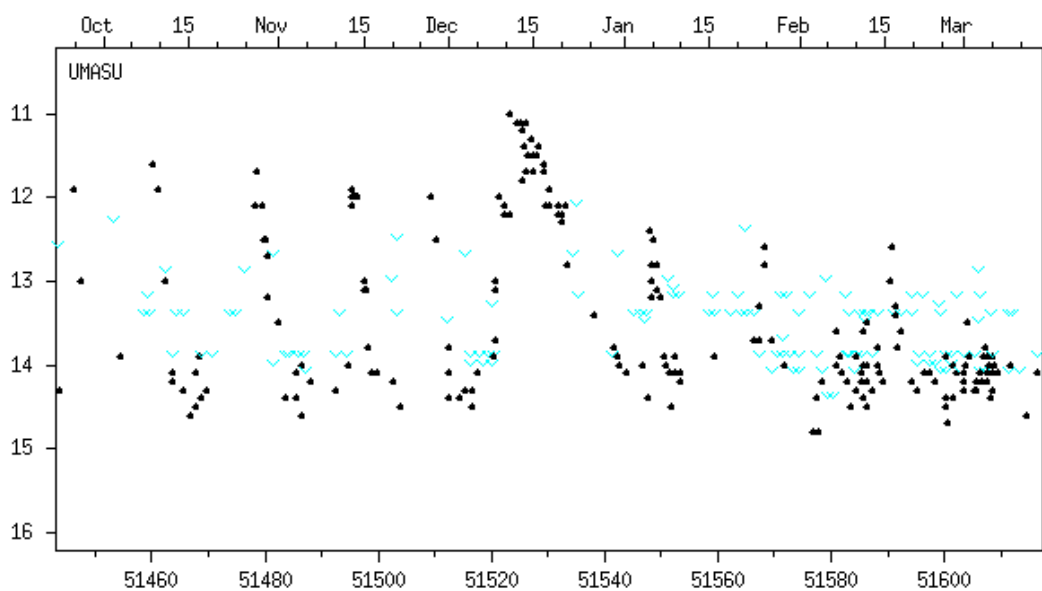


Figure 7: SU UMa 型矮新星の一つである、SU UMa の光度曲線。中央付近に見られる長いアウトバーストが superoutburst、そうでないものが normal outburst (VSNET に報告されたデータによる)。

### 1.2.2 SU UMa 型矮新星

軌道周期が2時間より短い矮新星では、2–3日で減光する通常のアウトバースト (normal outburst) の他に、極大光度が normal outburst に比べて 0.5–1.0 等ほど明るく、より長期間 (1–2 週間程度) 続く superoutburst の二種類のアウトバーストを示すことが知られている。このような矮新星を SU UMa 型矮新星という (Figure 7)。この superoutburst の最中には superhump と呼ばれる軌道周期より数%長い変動が見られる。このグループの天体に関する詳しい特徴については次項で詳しく解説する。

## 1.3 SU UMa 型矮新星

### 1.3.1 潮汐不安定性と superoutburst

SU UMa 型矮新星で superoutburst が観測される理由として、通常の矮新星アウトバーストを説明する熱的不安定の他に潮汐不安定性を加えた熱的潮汐不安定性 (Thermal Tidal Instability, TTI) モデルが唱えられてきた (Osaki 1989; Hirose and Osaki 1990)。この TTI モデルは円盤上の物質の軌道が伴星の潮汐力によって離心円状になることによって円盤上の物質の相互作用が急速に増加し、それにともなって物質が内側へと落ち込み、それが superoutburst につながると説明するものである。

激変星を構成する白色矮星と低温星のうち、白色矮星の質量はどの系でもそれほど大きく変わらない。また、低温星は Roche lobe を満たしており、また一部の例外を除き主系列星であることから、多くの激変星においては軌道周期と質量比  $q = M_2/M_1$  に一定の関係がある。また、主星の Roche lobe の相対的な大きさは質量比が小さい系ほど大きくなるため、質量比の小さい系ではより大きな半径まで広がることができる。 $q$  が 0.3 より小さい系では、軌道周期の 3:1 の共鳴半径の外側まで円盤が広がることが可能となる。ケプラー運動を仮定した場合、公転周期は軌道半径の  $3/2$  乗に比例することから、伴星と 3:1 の共鳴を示す粒子の軌道半径は主星-伴星の距離を 1 としたときに 0.48 となる。この半径まで円盤半径が達すると、3:1 の共鳴半径を運動する粒子は 3 公転に 1 回の割合で伴星から同じ方向に力を受けるため離心変形の摂動が成長しやすい条件になる。このことにより、3:1 共鳴半径付近を運動する粒子からなる軌道が離心円となる。このことにより円盤を形成する粒子同士の摩擦が大きくなり、通常より多くの質量降着が引き起こされる。これが superoutburst となるとするものである。

このとき共鳴により円盤を構成する粒子の軌道が円軌道から外れることが、もう一つの別の特徴的な現象である positive superhump を引き起こす要因ともなっている Whitehurst (1988)。伴星の重力を受けて円軌道から外れた粒子は、逆二乗則の主星の重力のみを考慮した場合の単純なケプラー運動とは異なり、閉軌道を保つことができない (詳しくは Section 4 で述べる)。そのため、円盤は回転方向と同じ向きで周期数日程度の歳差運動を示すようになる。superoutburst 中は伴星の潮汐力を受け

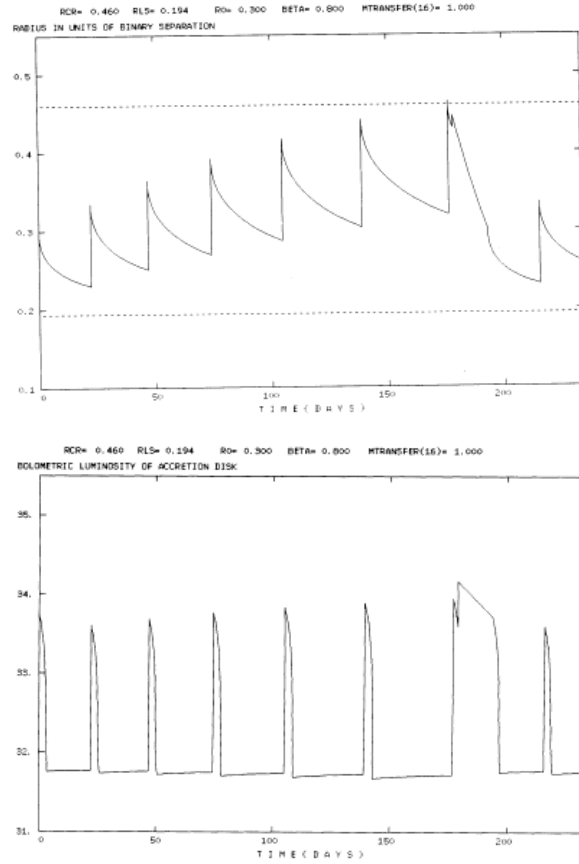


Figure 8: SU UMa 型矮新星についての数値シミュレーション。上段: 円盤の半径が normal outburst を繰り返すにともない増大し、最終的に 3:1 共鳴半径 (点線) に達する様子。下段: それに対応する光度曲線のシミュレーション。(Osaki 1989, Figure 3a,c)

る潮汐不安定性によってエネルギーの散逸が起きている状態であるため、円盤が伴星に近いほど大きなエネルギー散逸が引き起こされる。円盤は真円ではなく離心円の形であるため、円盤の半径がもっとも大きい向きを伴星が通過するときにもっとも円盤外縁部での質量降着は大きくなる (注: SPH シミュレーションによる数値実験では少し異なる結果になっている)。このとき、円盤自身が歳差運動を示しているため、伴星との会合周期  $P_{\text{SH}}$  は歳差運動  $P_{\text{prec}}$  によって円盤が回転した量に応じて公転周期  $P_{\text{orb}}$  長くなる。

$$\frac{1}{P_{\text{prec}}} = \frac{1}{P_{\text{orb}}} - \frac{1}{P_{\text{SH}}} \quad (4)$$

そのため、軌道周期より数 % 長い周期の superhump が引き起こされる (Hirose and Osaki, 1990)。

この潮汐不安定性理論によると、SU UMa 型の長期的な光度変化は次のように説明できる (Figure 8)。まず、通常の矮新星と同様、伴星からの質量輸送によって円盤上に物質が降着し、面密度が  $\Sigma_{\text{crit}}$  を越えると outburst が起きる。しかし、この outburst によって降着する物質は伴星から輸送された物質の 10% 程度にすぎないため、円盤の半径は最初の値まで小さくなることはなく normal outburst を繰り返しながら次第に増大していく。その結果、円盤の半径が 3:1 共鳴半径に達すると潮汐不安定性が引き起こされ、物質の主星への降着が一気に起こる (Osaki, 1989)。

この理論によれば、normal outburst の間隔は normal outburst を繰り返すごとに長くなる。これは、円盤半径が大きくなることと関連する。 $\Sigma_{\text{crit}}$  は半径が大きい場所ほど低くなり、また半径が大きいところほど同一半径の面積が大きくなるため、半径が増大するにつれ  $\Sigma_{\text{crit}}$  に達するのにより多くの質量輸送を要する。また、 $\Sigma_{\text{crit}}$  は半径によって異なる。

### 1.3.2 WZ Sge 型矮新星と early superhump

矮新星の中に、非常にアウトバースト頻度の小さい一群の天体があることが知られており、WZ Sge 型矮新星と呼ばれる (Bailey 1979 ;Downes and Margon 1981; Patterson et al. 1981; Kato et al. 2001)。この WZ Sge 型矮新星は、軌道周期が通常の SU UMa 型矮新星と比べて一般的に短いところに集中しており、0.054~0.064 日付近に多くみられる。

WZ Sge 型矮新星を定義づける特徴として、アウトバーストの初期に early superhump とよばれる変動がみられることが知られている (Kato, 2002)。この early superhump は通常の (positive) superhump と異なり、周期が軌道周期とほぼ一致している変動が 1 日 ~10 数日の間観測されるというものである。またほぼ single peak に近い通常の superhump と異なり、変動の形状が double peak をとることも知られている (図 9)。

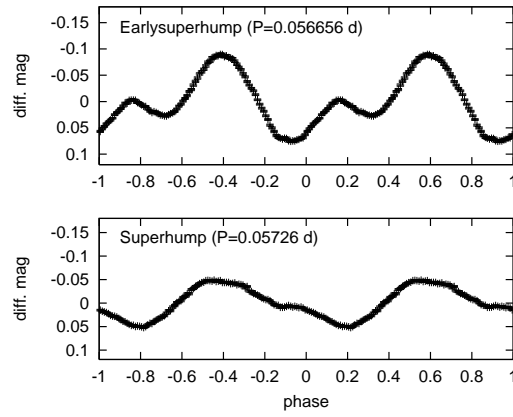


Figure 9: や座 WZ 型矮新星の代表的天体である WZ Sge の 2001 年 superoutburst における early superhump(上パネル) と通常の superhump(下パネル)。(Ishioka et al. 2002, Figure 4)

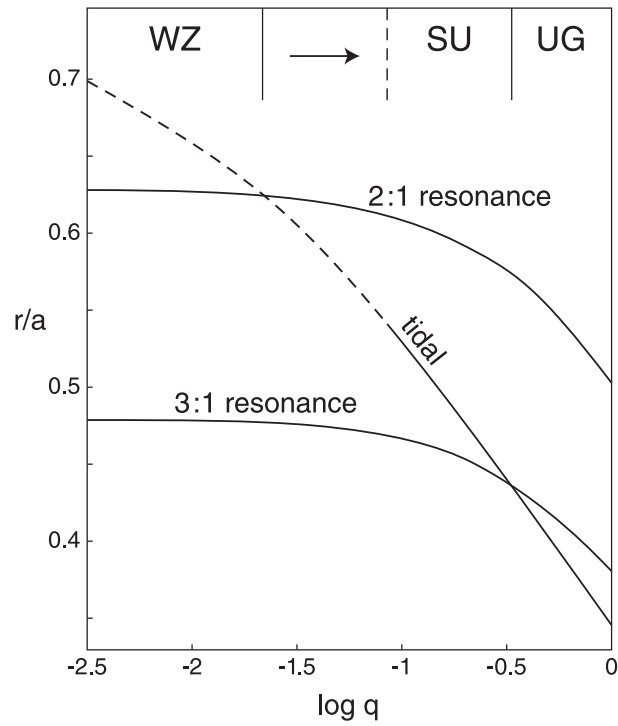


Figure 10: 連星の質量比と、それに対する円盤の外縁部の距離(連星間距離を 1 とする)。(Osaki and Meyer 2002, Figure 2)

このような変動がなぜ見られるかについて、現在広く受け入れられている見方は Osaki and Meyer (2002) による見方である。この見方によれば、 $q$  が特に小さい矮新星では円盤が伴星の 3:1 共鳴半径よりさらに外側の 2:1 共鳴半径まで広がるのが可能となるため、2:1 共鳴による潮汐不安定性が励起されるという考え方である (図 10)。3:1 共鳴半径で引き起こされる不安定性が角度方向で一方向のみに強められる一本腕振動となっているのに対し、この 2:1 共鳴半径によって引き起こされる潮汐不安定性は角方向に節を持ち二方向で強められる二本腕振動となる。そのため、3:1 共鳴半径が引き起こされている円盤の場合とは異なり、半径方向の変形は生じず、歳差運動は引き起こされない。しかし、潮汐不安定性による相互作用の増大が引き起こされている場所はそうでない場所に比べて温度が上昇しているため、単位面積あたりの光度がより大きい。そのため、観測者が円盤を観測したとき、この明るい部分が他の場所によって隠されている位相とそうでない位相で円盤全体の見かけの光度が変動し、これが early superhump として観測されることになると考えられている。

また、WZ Sge 型矮新星の系のうち一部の天体では通常のアウトバーストが終了してから再増光が見られることが知られている。この再増光にはいくつかのバリエーションが存在し、(1) 再増光自体が存在しないもの、(2) 1 度の短い (2~3 日) 再増光のみが見られるもの、(3) 1 度の長い (10 日以上) 再増光が見られるもの、(4) 複数の短い再増光が繰り返されるもの、に大きく分けられる。これらのうち、(1) と (2) については通常 SU UMa 型矮新星の多くでも報告されているが、(3)(4) については通常 SU UMa 型矮新星でも報告されておらず<sup>1</sup> ほぼ WZ Sge 型矮新星においてのみ見られる現象である。

## 2 連星系における進化

### 2.1 長期的な進化

恒星間の距離の小さい連星系では、進化の過程で質量の交換などが起こるために通常の単独星やお互いの進化の影響を受けない星とは異なった進化のプロセスを示すことが知られている。矮新星の場合伴星が Roche lobe を満たしているため、両星間の距離が縮まるか、伴星の半径が増大すると主星に向かって質量輸送が生じる。軌道周期が長い系 (3 時間以上) の場合、主に磁気ブレーキ (magnetic braking, Verbunt and Zwaan 1981) によって軌道角運動量が抜き取られ伴星の物質は主星に向かって輸送されていき、それに伴い伴星の質量が低下する。また、軌道周期が短い系 (2 時間以下) では、伴星は中心まで完全に対流状態 (fully convective) にあるために磁場の

---

<sup>1</sup>、  
<sup>1</sup> 特殊な進化段階にある天体の QZ Ser は WZ Sge 型ではないにも関わらず複数の再増光が報告されている。(vsnet-alert 15620, <http://ooruri.kusastro.kyoto-u.ac.jp/mailarchive/vsnet-alert/15620>)

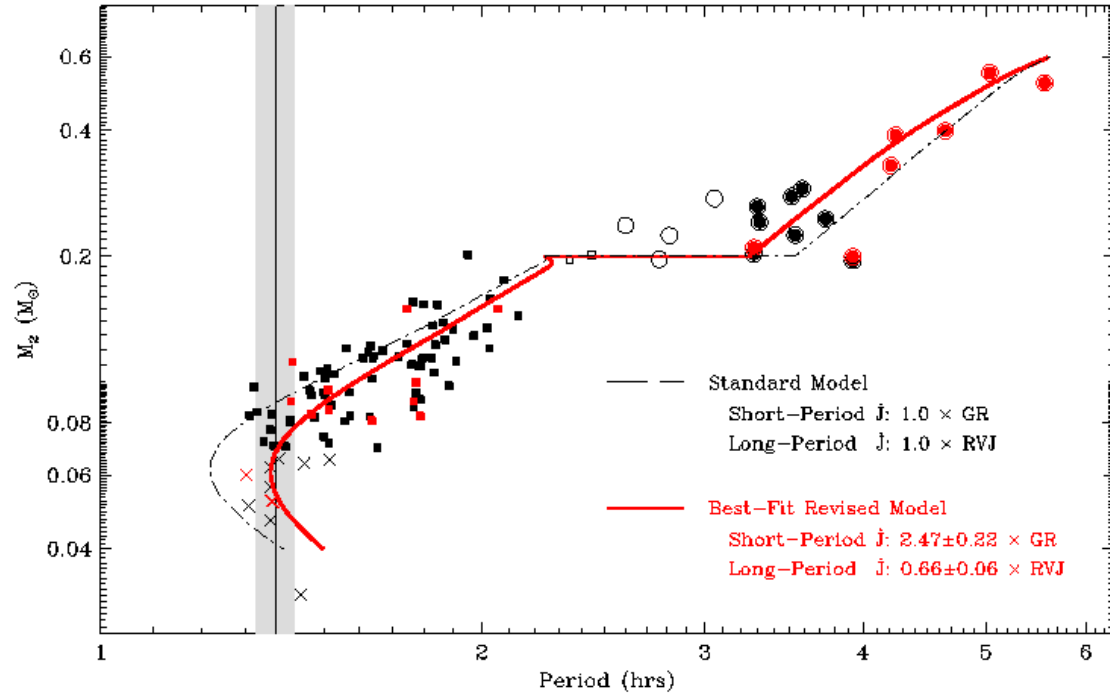


Figure 11: 典型的な矮新星の進化経路。(Knigge et al. (2011), Figure 9)



活動が弱まっておりこのような現象は起きないが、重力波放出 (gravitational wave radiation) により両星間の角運動量が抜き取られ、その結果距離が次第に小さくなりそれに伴って伴星の Roche lobe の大きさが小さくなるため、溢れ出した物質が主星に向かって降着する。激変星で質量輸送が起きているのはこのようなメカニズムによるものであると考えられている。

このようなプロセスのため、激変星の大局的な進化として磁気ブレーキによる物質の損失や重力波放出による連星間距離の減少により質量輸送が起こるとともに軌道周期が次第に長い側から短い側へと減少していく。その一方で、伴星から主星への質量輸送が伴うため、このような周期の減少に伴い伴星の質量は次第に小さくなっていくという描像が描かれる。この図式は、伴星が縮退し始めるまで続く。安定な平衡状態を保つために必要な半径が縮退していない天体では質量が大きいほど大きい一方で縮退している天体では質量が小さいほど大きいため、伴星が縮退し始めた系では質量の輸送が起きるにつれて両者間の距離が増大するようになる。このため、激変星の軌道周期には理論的な下限が存在するとされる (King et al., 2002)。

重力波放出による角運動  $J$  の減少は、

$$\frac{\dot{J}}{J} \propto \frac{M_1 M_2}{a^4} \quad (5)$$

( $\dot{J} = dJ/dt$ 、 $a$  は両星間距離) で表されることから、このメカニズムによる質量輸送率は連星の進化が進むほど小さくなり、次第にアウトバースト頻度は小さくなる。WZ Sge 型矮新星は総じてアウトバースト頻度が低いが、これはこのような進化のプロセスで質量輸送率が非常に小さくなっているためにアウトバーストを引き起こすのに十分な物質が降着するのに時間を要するためと考えることができる。ただし、近年の計算結果ではそこまで質量輸送率は

## 2.2 激変星進化に対する新星爆発の影響

白色矮星の表面に物質が降り積もるにつれ、降り積もった物質は強い表面重力を受けるため、後から降り積もった物質の圧力を受ける。そのため、表面に降り積もった物質の下部の温度は次第に上昇する。核融合反応を起こすのに十分な温度まで達すると、白色矮星表面で熱核融合が生じる。しかし白色矮星は電子縮退しているために、通常の日体の核融合とは異なり核融合によって生じた温度上昇に伴う圧力の上昇が起らず、暴走的に温度の上昇が引き起こされ表面の物質を吹き飛ばす。これと同時に数等  $\sim 20$  等級明るくなる。このような現象を新星 (nova) と呼んでいる。

新星爆発は伴星からの質量輸送率に応じて繰り返し替えされる。しかし、反復新星 (reccurent nova) と呼ばれる特に増光間隔が短い ( $\sim$  数十年) ものを除き、一般的には新星爆発の間隔は数千年以上の周期であるとされる。過去に爆発した新星の記録について調べると、現在その対応天体が知られている天体が 200 年以上遡って知る

ことができない。対応天体が知られている新星のうちもっとも古いものは1787年の WY Sgeである<sup>2</sup>。このような古い新星が見つからないという現象に基づいて、前述の進化より短い激変星進化のモデルとして「冬眠」(hibernation) 理論が提唱されている (Shara, 1989)。これは新星爆発のサイクルと矮新星を結びつけるもので、矮新星は新星爆発のサイクルの間に生じるものだという見方である。

新星爆発を起こす天体の多くは高い質量輸送率を持ち、常に円盤の面密度が $\Sigma_{\text{crit}}$ より大きくなっている新星類似型の天体であると考えられている。また、新星爆発後の白色矮星は高温になっているため、伴星が受ける照射による加熱が大きくなっており、そのためより大きな質量輸送率を持つようになっている。しかし白色矮星表面が冷却されることに伴って、照射による加熱は小さくなり質量輸送率が低下する。この結果、円盤の面密度が $\Sigma_{\text{crit}}$ より小さくなると、この系は新星類似型から矮新星へと移行する。また、さらに白色矮星が冷却されると伴星が Roche lobe を満たさない分離型連星になり、円盤の形成が行われなくなるためにそれまでに比べてはるかに暗くなる。このため、古い新星の爆発後の天体はほとんど発見されることがないのではないかと考えられる。この仮説の元では、矮新星のうち一部は近い過去に新星爆発を示した系である可能性が示唆される。

---

<sup>2</sup>1670 年の新星として知られる CK Vul は現在、古典新星である確証はない (Kato, 2003; Evans et al., 2002)。

# Chapter 2

## Introduction II: 激変星の新しい描像

### 3 従来の描像に対する問題点

前章で紹介してきたような描像は、2000 年頃までは広く受け入れられていた。しかし、1990 年代の半ばからこれに反する観測結果が報告されはじめており、2000 年代に入るところになると描像の新たな見直しが迫られることとなった。

#### 3.1 1990 年代前半までの superhump 周期に関する見方

矮新星のアウトバーストは、円盤上の物質が内側に落ち込むことによって起こる。このことから、アウトバーストが進むにつれ円盤の半径は小さくなることが期待される。

スーパーアウトバーストの場合、スーパーハンプの周期は公転周期と円盤の歳差運動の beat cycle によって決まる。円盤の半径が小さくなると受ける潮汐力が小さくなるため、beat cycle は長くなる (詳しくは、Section 4 参照)。結果として superhump の周期は減少することになる。このことから、スーパーアウトバーストの終了が近づくに連れて superhump 周期は減少することが期待される。実際には、周期の連続的な減少をとらえることは観測精度の問題などから難しい。そのためしばしば用いられるのが  $O-C$  カーブを用いた方法である。この方法は以下のようにして周期の変動を見積もる。まず、あらかじめ PDM・フーリエ解析などの手法で平均周期を求めるか、目視で変動の周期を見積もった上で、その周期と極大時刻を元にした予報式を立てる。これにより、元期にあたる  $E$  回後の superhump の極大時刻の予報時刻は以下のように計算できる。

$$C = T_{\text{epoch}} + P \times E \quad (6)$$

このとき、実際に観測される  $E$  回目の極大時刻  $O$  は、それまでの  $E$  回分の 1 周期に要した長さの和であるから、

$$O = T_{\text{epoch}} + \sum_{i=1}^E P_i \quad (7)$$

と書き表せる。そのため、

$$O - C = \sum_{i=1}^E P_i - P \times E = \sum_{i=1}^E P_i - P \quad (8)$$

となり、 $O - C$  の値は、 $P_i - P$  の和とした結果として得られた値と解釈することができる。このことから、周期が単調増加する場合  $O - C$  の値は下に凸の形の曲線になり、特に周期が一定の割合で増加する場合は放物線が得られる。その一方で周期が単調減少する場合は  $O - C$  の値は上に凸の形の放物線になる。特に、周期が一定の割合で減少する場合は  $O - C$  の値のグラフは下に凸の形の曲線となる。このような手法を用いて、superhump の周期変化を追った観測から得られた  $O - C$  カーブはいずれも下に凸の形状の放物線で近似できるとされた (e.g. Warner 1995)。このことから、superoutburst の進行にともなって周期が減少するのは円盤半径が減少することと関係があるのだろうと考えられるようになった (Lubow, 1992a)。

superoutburst 中の superhump 周期の経過について最初に論じられたのは、VW Hyi の観測においてである。この中で、superhump 周期の減少が報告された (Vogt, 1974)。VW Hyi についてはその他にもいくつかの観測が行われ (e.g. Vogt 1983)、いずれにおいても同様の superhump 周期の減少を示した。また、他のいくつかの SU UMa 型矮新星についても同様の結果が報告されている (TU Men: Stolz and Schoembs 1981; SU UMa: Udalski 1990; Z Cha: Kuulkers et al. 1991)。

一方、Semeniuk (1980) が矮新星 V436 Cen の superoutburst の最中に 9 夜にわたる観測を行い、superhump 周期が増加するという現象を報告している。この当時はまだ superhump の素性について明らかにされていなかったため、superhump 周期は orbital period に漸近していくものであり、V436 Cen の場合 superhump は orbital period よりも短いのかもしれない、と論じている。しかし、その後 Vogt (1983) で superoutburst の後期には位相が 0.5 ずれた slate superhump がみられるという報告がなされたことを受けて、Warner (1983) は Semeniuk (1980) で報告された superhump の極大のうち最後の 2 夜の superhump は late superhump に相当するもので、半位相ずれているものであるから実際にはその補正をすれば superhump 周期の時間変化  $dP/dt = P_{\text{dot}} < 0$  となるという可能性を提案した。

また、Krzeminski and Vogt (1985) は矮新星 OY Car の superoutburst の観測から  $P_{\text{dot}} > 0$  となる観測結果を報告している。しかしながら、Patterson et al. (1993a)

はこの値を必ずしも明らかなものではないとし、Schoembs (1986) の値を引いて光度に対する周期の変化  $dP/dm$  が他の天体と同様の結果を示すことから OY Car もまた他の SU UMa 型と同様の superhump 周期の変化を示すものとされた。次の項目で詳述するように、この Patterson et al. (1993a) はその後の矮新星の観測にもとづいた理論の形成に対して強い影響力を持つことになった。

### 3.2 1993 年: Patterson et al. (1993a) による解釈

Patterson et al. (1993a) は、この論文で新たに superoutburst 中の周期変化をとらえることができたことが発表された VY Aqr を含め、それまでに superhump が論文の形で 18 天体について superhump 周期の変化について議論するためにより詳しい解析を試みた。これら 18 天体のうち、10 天体はデータあるいは superhump の観測期間が短いために周期変化を論ずることは難しく、周期変化に関する議論ができる程度に長い観測が得られている 8 つの天体についてより詳しく superhump の周期を論じた。

これら 8 天体のうち 5 天体については superoutburst の発展とともに周期が減少するという結果を得た。また同様に、光度が減光するとともに周期が減少するという結果を得た。残り 3 天体についてはやや議論の余地がある結果であるが、これらのうち OY Car と Z Cha の 2 つの系は食を持つ系であるためにその問題を考慮する必要があり、また WZ Sge については浅い食に起因する orbital modulation のために superhump の極大の位置がわかりにくい、としている。しかし、Patterson et al. (1993a) はこれらすべての系について  $P_{\text{dot}} < 0$  であるとした。これらの結果から、 $P_{\text{SH}} = -6 \times 10^{-5}$  という割合が標準的な superhump 周期の減少の割合であるとした。

ただし、実際には 1995 年に V1028 Cyg の superoutburst が観測され、この際に superhump 周期の増加が観測されていた (Baba et al., 2000) が、この天体に関する論文は発表が 2000 年となった。

### 3.3 1995 年: $P_{\text{dot}} > 0$ の系の発見

Nogami et al. (1997)、Howell et al. (1996) によって、1995 年の AL Com の superoutburst 中の観測から superhump の周期がアウトバーストの進行とともに増加するという現象が報告された。Nogami et al. (1997) は  $O-C$  カーブから superhump 周期の増加率として  $7.3 \times 10^{-4}$  を得、これはそれまで知られていた SU UMa 型矮新星の中でもっとも大きい値であることを示した (Figure 12)。またこれは従来の円盤の半径の減少を反映して superhump 周期が減少するという描像に一致しない観測結果であり、この天体の円盤上で通常の SU UMa 型とは異なった物理状態が発生している可能性を示唆した。Howell et al. (1996) は、この天体の周期変化は非常に複雑であると述べた。また、通常の superoutburst が終わった後で非常に長い再アウトバース

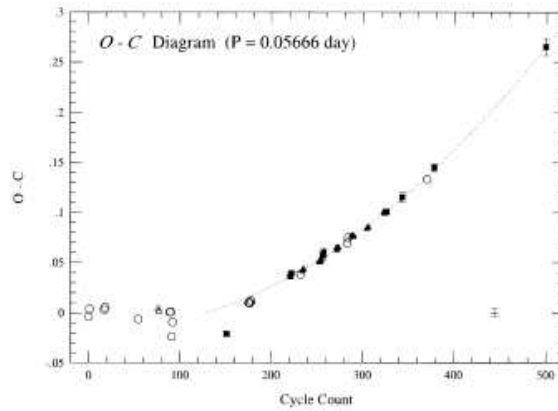


Figure 12: AL Comにおける superhump 極大時刻の  $O-C$  図。下に凸になっており、superhump 周期が増大していることを示唆している。(Nogami et al. (1997), Figure 2)

トを示すというもう一つの特徴を示したことから、複雑な周期変化はこの再アウトバーストを引き起こすメカニズムと関係があるであろうと論じた。また、これとほぼ同時期に、その他いくつかの軌道周期が短い系を中心に同様の superhump の増加が観測されたという報告がなされた (e.g. T Leo: Kato 1997; SW UMa: Semeniuk et al. 1997; Nogami et al. 1998; HV Vir: Kato et al. 2001; V485 Cen: Olech 1997)。

これらの天体のうち、HV Virはアウトバースト直後に出版された論文では既に知られていた天体と同様に superoutburst の進行とともに superhump 周期の減少が生じると報告されていたが (Leibowitz et al., 1994)。これは当時まだ early superhump の存在が認識されていなかったために early superhump と通常の superhump がはつきり区別されないままに superhump の解析がなされ、正しい周期が見積もられなかったためだと思われる。また、QZ Vir(T Leo)については Lemm et al. (1993) が Kato (1997) と同じ 1993 年の superoutburst で得られた superhump を解析し、 $P_{\text{dot}} < 0$  という結果を報告している。これは観測点が少ないことと、後述する当時は存在が知られていなかった stage C superhump が混合していたことによる (Section 2 参照)。AL Com については Patterson et al. (1996) が Nogami et al. (1997)、Howell et al. (1996) と同じ 1995 年の superoutburst の際に観測を行って  $O-C$  を求めた結果を報告している。この論文では  $O-C$  はフィッティングの結果正の値をとるが、観測点が superoutburst を通じて均等になく局在しているため、この局在性を補正すると正の値をとるというやや強引な解釈を論じた。SW UMa の 1996 年の superoutburst についてはこのような異論が出ることはなく、 $\dot{P} > 0$  が成り立っていることが受け入れられた。SW UMa が最初に  $\dot{P} > 0$  が確定した天体と考えられる。

これらの発見をうけ、軌道周期の短い系では  $\dot{P}$  が負の値をとらないのではないかという示唆がなされるようになった。また、このような  $\dot{P}$  の振る舞いは superoutburst 中に円盤の半径が小さくなるために superhump の周期が減少する、という従来の描像からは説明することができない。Kato et al. (1998) は、質量比が小さい系では 3:1 共鳴半径が Roche lobe に比べてかなり内側に位置するために superoutburst が進行するにつれて 3:1 共鳴半径で起こる円盤が通常の系のように内側に広がるだけでなく、外側へも広がるのではないかという見方を提示している。

### 3.4 2000 年代の動向

2000 年代前半になると、superhump 周期の superoutburst 中の発展についてさらにさまざまな問題点が出てくるようになった。以下、問題点別にみていくことにする。

#### 3.4.1 不連続な周期変化の発見

まず、2000 年代前半になるとアウトバーストの間の superhump 周期の変動が一様ではないという指摘がなされるようになった。それまで報告された観測からは、周期が減少する場合にせよ増加する場合にせよ、放物線でほぼ  $O-C$  カーブが近似されるという結果が得られていた。これは、円盤の半径が増加あるいは減少の傾向がほぼ一定の速度で起こるということを示唆していた。しかし、Oizumi et al. (2007) は V844 Her のスーパーアウトバーストの際に観測されたデータによって作成した  $O-C$  カーブから、ほぼ全期間についてこの天体の superhump 周期が増加の傾向を示す一方で、ごく初期については上に凸の放物線からかけ離れた  $O-C$  の値が現れることを指摘した (Figure 13)。これは、初期の superhump 周期が放物線で近似できる時期の superhump の周期とは異なるためであるからであろうと考えられた。またほぼ同時期に、Imada et al. (2008) は、FL TrA のスーパーアウトバースト時の観測でも同様に得られた superhump の極大時刻から  $O-C$  カーブを作成した場合に、アウトバースト初期のものが放物線から近似から外れてくることを示した。Soejima et al. (2009) も矮新星 ASAS J160048-4846.2 で同様に放物線で表現できない時期が存在することを示し、さらにこの時期が superhump の振幅が次第に大きくなっていく時期と一致しており、superhump の振幅が最大に達したところで周期の急激な変化が生じるということを示唆した。

Soejima et al. (2009) はそれと同時に、アウトバースト初期だけではなくアウトバーストの最終段階でも同じようなずれが見られることを発見した。これに加え、Ohshima et al. (PASJ submitted) では QZ Vir (T Leo) の 2007 年から 2009 年の 3 回の superoutburst の観測から、同様に superoutburst の後半に superhump の周期が突然変化する時期があることを指摘した。特に、この時期に観測が欠けた場合この周期の差が原因で位相が反転したように見えるのではないかと疑われた (これが従来、

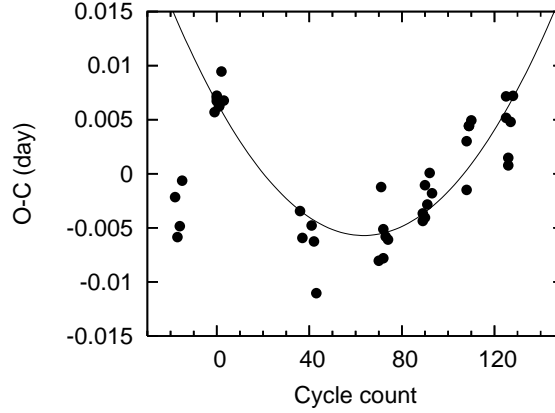


Figure 13: 矮新星 V844 Her で、アウトバースト 初期に放物線にうまく合致しない superhump maxima が報告されていたケース。Oizumi et al. (2007), Figure 10)

late superhump と解釈されていたと考えられる)。またアウトバーストの後半には、それまでに比べると短い superhump 周期を示すことが明らかになった。

### 3.4.2 precursor と $P_{\text{dot}}$ の関係

Uemura et al. (2005) は TV Crv の 2001 年と 2004 年の 2 回の superoutburst 中に superhump を観測し、周期の変化を求めた。そして、2001 年と 2004 年ではこの天体の superhump は異なった  $\dot{P}_{\text{SH}}$  を持つのではないかという結果を得た。つまり、2001 年の superoutburst では  $\dot{P}_{\text{SH}} > 0$  であった一方で、2004 年の superoutburst では  $\dot{P}_{\text{SH}} < 0$  という結果が得られたのである (Figure 14)。Uemura et al. (2005) はこの 2 つの superoutburst で precursor outburst の有無の違いがあったことに着目した。2004 年の superoutburst では precursor outburst から superoutburst へと発展していったことがわかっている一方で、2001 年の superoutburst ではそのようなものは観測されていない。この違いから、precursor outburst によって引き起こされた superoutburst は円盤半径が precursor によって初めて 3:1 共鳴半径を越えるが、precursor のない superoutburst では outburst が引き起こされた時点ですでに 3:1 共鳴半径よりも外側に物質がひろがっており、そのためにアウトバーストから時間が経ってもまだ eccentricity が増大することが可能であるために  $P_{\text{SH}}$  が増加するのではないかという仮説が唱えられた。

しかしその後、Oizumi et al. (2007) は V844 Her の複数の superoutburst について  $\dot{P}_{\text{SH}}$  を求め、superoutburst ごとの大きな変化は見当たらないという結果を示した。さらに Ohshima et al. (PASJ submitted) は QZ Vir の 2007–2009 年の間における 3 回の superoutburst を観測してそれぞれについて  $\dot{P}_{\text{SH}}$  を求め、それぞれの間



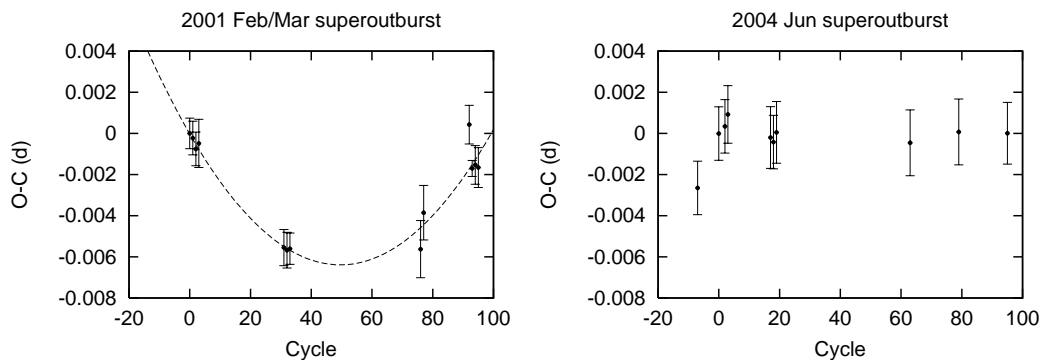


Figure 14: TV Crv の 2001 年と 2004 年の superoutburst の間での  $O - C$  図の違い。2001 年の superoutburst では明確な  $\dot{P}_{SH} > 0$  の傾向が見られる。(Uemura et al. (2005), Figure 5)

で superhump 周期の発展に大きな違いはないという結果を得た。特に、2008 年の superoutburst では precursor outburst が観測されたにもかかわらず  $\dot{P}_{SH}$  の正負に対する違いが見られないため、Uemura et al. (2005) で提案された描像とは合わない結果となった。

Imada et al. (2006) は GZ Cet の superoutburst の観測でこの天体の軌道周期が 0.0553d (Szkody et al., 2003) と短いにも関わらず、superhump の周期の変動において  $\dot{P}_{SH} < 0$  の傾向がみられたことを報告した。この原因について Uemura et al. (2005) でなされた見解を踏まえ、この天体では 3:1 共鳴半径の外側に物質が降着していなかったことと関係があるのではないかと仮説を提唱した。

### 3.4.3 superhump 周期変化の総括 (Kato et al., 2009)

これらの結果をうけ、Kato et al. (2009) では、それまでに観測された SU UMa 型の superhump 周期の変化を系統的にまとめた。これによると、SU UMa 型矮新星の一般的な superhump 周期の発展は stage A, B, C の 3 つの時期に分割される (Figure 15)。これらの 3 つのステージは、ステージ内の平均値で比べた場合長い順に stage A, B, C となっていて、これらの間の移行つまり、stage A-B、stage B-C の変化は突然生じる。これらの 3 つのステージのうち、従来知られていたようなほぼ単調な増加や減少が見られる時期は stage B にあたる。この stage B における周期の変化が減少するか増大するか、およびその変化の度合いは軌道周期の長さや superhump 周期に大きく関わっており、周期 0.08 日より小さな superhump 周期を持つ系では、superhump 周期は stage B の期間中に増加する傾向がみられる。

また、superoutburst の最終段階に由来は late superhump と呼ばれる位相が半位相

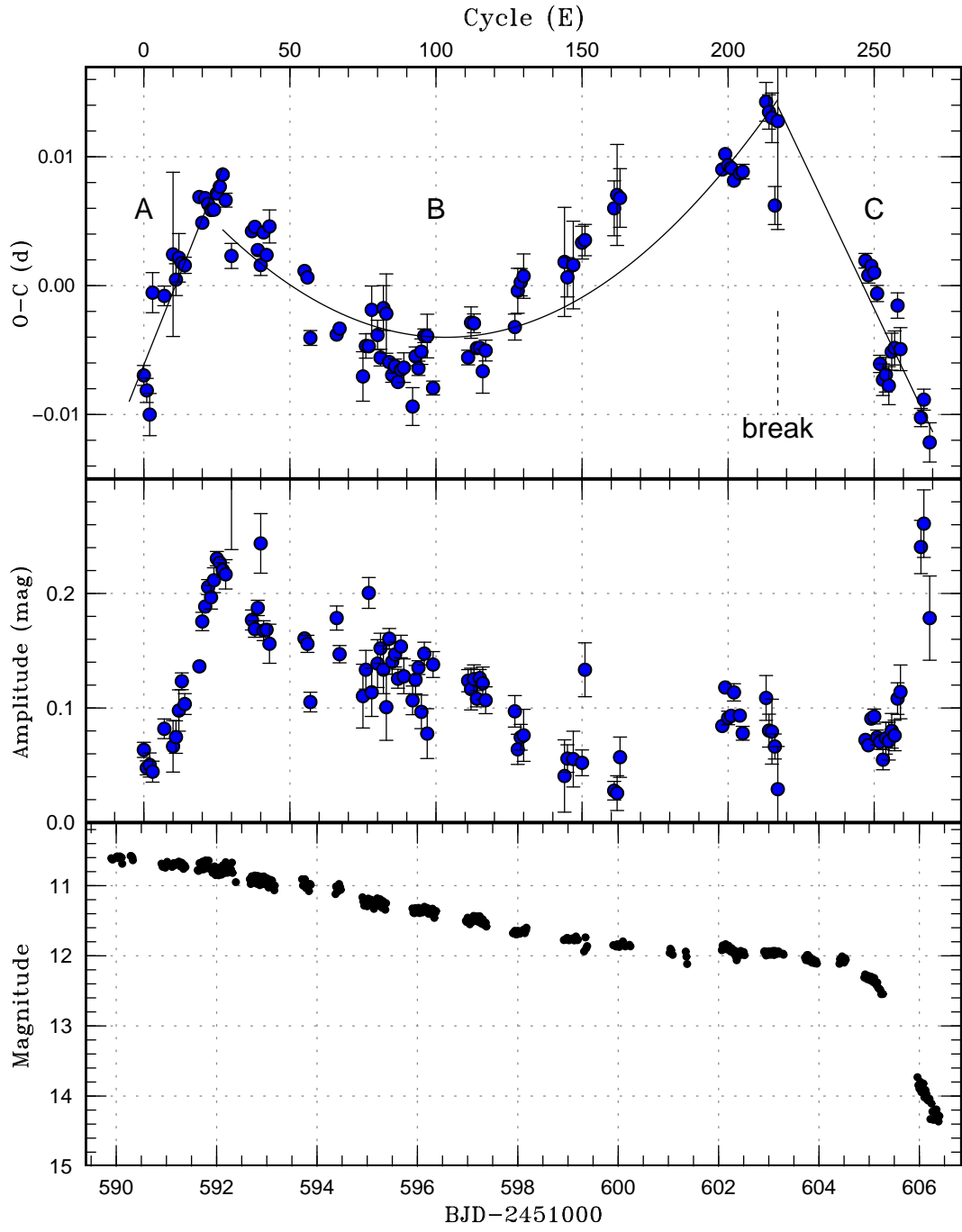


Figure 15: 矮新星 SW UMa の superoutburst 中の  $O-C$  カーブとそれに対応する光度曲線および superhump の振幅。(Kato and Osaki (2013b), Figure 1)

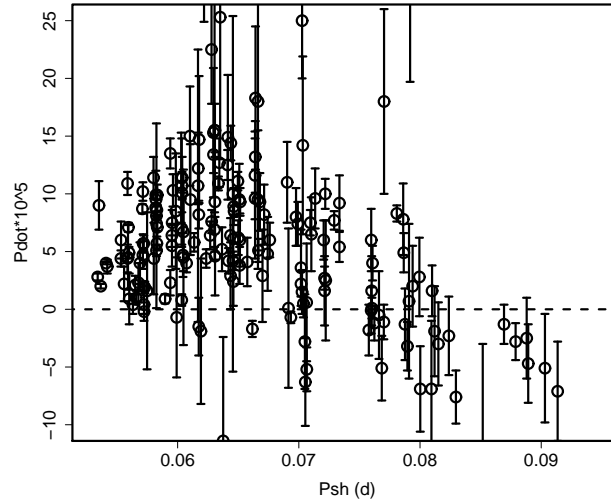


Figure 16: Stege B superhump 周期と superhump 周期の変化の関係。(Kato et al. (2009), Figure 13)

ずれた superhump が見られるとされていた (Vogt, 1983)。従来はこの late superhump は通常の superhump とは異なり、伴星からの質量降着流が円盤上に衝突する際に形成される hot spot の運動を見ているもので、この時期にはまだ円盤はまだ円形に戻っていないために hot spot の形成される半径が公転とともに変化していくために衝突に伴って放出される位置エネルギーは変動し、それによって hot spot の明るさが変化するために生じる変化であると説明されていた (Schoembs, 1986)。Kato et al. (2009) は、この現象が見かけのものにすぎず、実際には位相の反転は起きていないということを明らかにした。つまり、stage B, C に対応する時期に従来のように superhump 周期が変化していないと仮定した場合、観測の空白の間に stage B stage C の superhump 周期の差が蓄積する。この時期は superoutburst の後半にあたるために観測が途切れることが多いが、stage C superhump の周期は移行直前の stage B superhump の周期に比べて  $0.5 - 1.0\%$  短い。そのため、50 cycle 分の欠測期間があった場合ちょうど半位相に相当する差が生じる。stage B, C の存在が認識されていなかった時代は superoutburst 全体から平均 superhump 周期を算出していたためこれが周期の変化として認識されにくく、このため見掛け上位相が反転したように解釈されたものだと考えられる。また、1993 年に superhump 周期が減少するのが一般的な傾向であると論じた Patterson et al. (1993a) で明確な superhump 周期の減少が見られるとされていた VY Aqr であるが、その後 2008 年の superoutburst に伴う観測によってこの天体もやはり stage B では  $\dot{P}_{SH} > 0$  となっていることが明らかになった。さらに Uemura et al. (2005) で示された  $\dot{P}_{SH}$  の違いについては、2001 年の superoutburst では superhump の発展後と、まだ superhump が十分に成長していな

い段階の観測しかなされておらず、ちょうど stage A に相当する観測が抜けていたために  $\dot{P}_{\text{SH}} > 0$  の結果が得られた一方で、2004 年の superoutburst では stage A, B の両方が観測されておりかつこれらを一連のものとして  $\dot{P}_{\text{SH}}$  を求めたために  $\dot{P}_{\text{SH}} < 0$  という結果が得られたものであることが判明した。Imada et al. (2006) についても、stage B-C transition に対応する部分を観測しているために  $\dot{P}_{\text{SH}} < 0$  の結果が得られたものであると解釈できる。

stage A が superhump の成長しつつある phase にあるという想定のもとで、Kato et al. 2009 は stage B へと移行した直後の時期が 3:1 共鳴による superhump が十分に成長した段階を反映しているということを仮定していた。しかし、この見方はのちに superhump excess に関する理論との整合性からさらに改められることになった。次章では、superhump excess に関する知見の変遷について考える。

## 4 superhump excess の問題について

### 4.1 Osaki(1985) での見積りについて

superhump は軌道周期に比べて数%長いことが知られており、fractional superhump excess と呼ばれる。これは、以下のような式で表せる。

$$\epsilon = (P_{\text{SH}} - P_{\text{orb}})/P_{\text{orb}} \quad (9)$$

上でも述べたように、連星系の質量比が beat cycle の値を決める上でのファクターとなるため、この  $\epsilon$  の値は質量比に大きく依存する。Patterson et al. (2005) は  $\epsilon = 0.18q + 0.29q^2$  という関係を示している。

このような  $q$  と  $\epsilon$  の関係は superhump を観測することによって系の  $q$  を見積もることができるということを意味する。一般的に、連星系の  $q$  は分光観測によって系のスペクトルを得て、そこに見られる主星由来のものと伴星由来のものそれぞれの輝線・吸収線のドップラーシフトの変動幅の比を求めることによって、求められる。しかし、この方法は軌道周期より十分に短い露出時間でスペクトルを得ることが出来る程度に明るい系に対して使うことができない。また、軌道周期の短い激変星は伴星の質量が小さいために一般的に伴星の絶対光度も非常に暗いためこのような方法で  $q$  の小さい SU UMa 型の矮新星の質量比を求めるのは非常に難しい。そのため、superhump 周期から  $\epsilon$  を求め、 $q$  を見積もることは軌道周期の短い系の物理的パラメータを知り、連星の進化を考える上で重要な手法となる。

前章でも触れたとおり、SU UMa 型矮新星の中には非常にアウトバースト頻度の低い天体として WZ Sge 型矮新星と呼ばれるサブグループが存在する。WZ Sge 型の系の特徴の一つに、outburst の終了後複数、あるいは非常に長い再増光を示すことがあるという点がある。このような再増光は短いものが一度だけ起こるという現

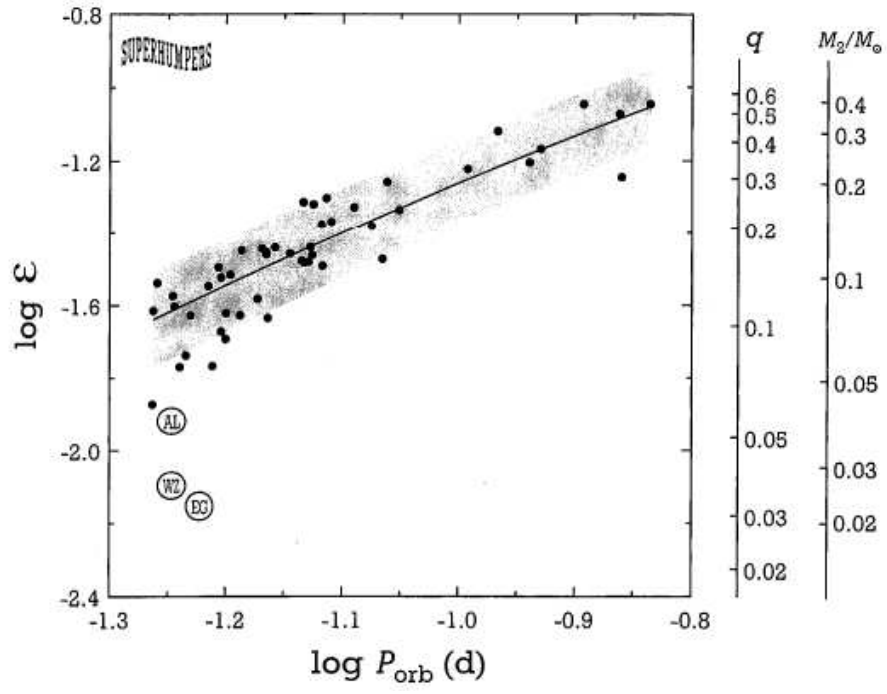


Figure 17: Patterson et al. (1998) で示唆された EG Cnc の進化トラックで占める位置。(Patterson et al. (1998), Figure 10)

象は通常の SU UMa 型矮新星でも報告されているが、複数、あるいは非常に長い再増光は進化的に特異な段階にあると考えられる一部の例外を除いて WZ Sge 型矮新星でしか報告されていない。ただし、全ての WZ Sge 型矮新星がこのような再増光を示すわけではなく、再増光を起こすものと起こさないものの間にはパラメータとして違いが存在するのかどうかという問題があった。

従来、 $\epsilon$ を用いて見積もった  $q$ を用いた  $q$ と  $P_{\text{orb}}$ の関係から、このような WZ Sge 型の天体のうち複数の再増光を示す天体がこの理論的な下限を過ぎて軌道周期が増加しつつある段階にある天体、“period bouncer”ではないかと考えられるようになった。特に、1996 年にアウトバーストを示した EG Cnc は非常に  $q$ が小さい天体だったために period bouncer ではないかという説が提唱された (Patterson et al., 1998)。

この  $\epsilon$ がどのように決まるのかという問題について、Osaki (1985) は以下のような式を導いた。

$$\frac{\omega_{\text{beat}}}{\omega_{\text{orb}}} = \frac{3}{4} \frac{q}{\sqrt{1+q}} \left( \frac{R_d}{a} \right)^{3/2} \quad (10)$$

これは、superhump が円盤の precession によるものであるという仮定のもとでは superhump の振動数  $\omega_{\text{SH}}$  と軌道周期の振動数  $\omega_{\text{orb}}$ 、および円盤の precession beat の振動数  $\omega_{\text{beat}}$  の三つの間に  $\omega_{\text{beat}} = \omega_{\text{orb}} - \omega_{\text{SH}}$  の関係があることを用いて、伴星の重力に起因した軸対称成分による逆 2 乗則からの外れを考えて、 $R_d$  の 1 次までの摂動から求めたものである。

この式 (式 10) について、円盤の外縁半径が 3:1 共鳴半径に達していたとすると、連星間距離に対する円盤の大きさは 0.46 となるので、上の式はそれを代入して

$$\frac{P_{\text{orb}}}{P_{\text{beat}}} = 0.233 \frac{q}{\sqrt{1+q}} \quad (11)$$

と書くことができる。また、この当時知られていた天体の superhump 周期のリスト (Ritter, 1984) のうち、既に軌道周期が明らかになっている 7 天体について  $\epsilon$  と軌道周期の関係をプロットした場合に、これを当時求められていた  $P_{\text{orb}}$  と伴星の質量  $M_2$  の関係式 (Paczynski, 1981) から見積もった進化曲線と比べることによってこれら 7 天体のうち 1 天体 (WZ Sge) については伴星が縮退した状態にいるのではないかという可能性を提示した。

## 4.2 Hirose & Osaki (1990) での見積りについて

中心天体の回りを公転する粒子の場合、公転軌道の半径方向にわずかな摂動を与えた場合に元の軌道半径を中心にして単振動状の中心からの距離の変化を示す。他に天体がない場合、この軌道半径の変化の単振動の周期は公転周期と一致するため、1 公転後に元の位置に戻る。この場合粒子が受ける重力は、中心天体からの距離に対して 2 乗に反比例して小さくなっている。しかし、このときに公転軌道の外側にもう

一つの重力場があった場合、粒子の受ける重力は中心天体からの距離に対して 2 乗より少し小さな値に反比例して弱くなる。この場合、摂動によって引き起こされる軌道半径の変化は正確な 1 公転周期より少し長くなる。そのため、長期的には粒子の遠星点は次第に公転方向に移動していく。これが粒子でなく円盤のばあい、遠星点の代わりに離心円状の円盤が公転方向に歳差を示すようになるという現象となる。

このような円盤について、Hirose and Osaki (1990) は 2 つの重要な研究を行った。1 つは質量比の小さい ( $q < 0.25$ ) 連星系で円盤が伴星の潮汐力によって離心変形を起こし、superhump が生じることを粒子法の流体力学的数値実験によって示した。

もう 1 つは、質点の運動に対する eccentric mode の線形解析をすることにより、3:1 共鳴のみが eccentric instability に対して正の成長率を示すことを示した。

このとき主星と伴星の重力場中での離心円盤 (リング) の歳差角運動は、

$$\frac{\omega_{\text{beat}}}{\omega_{\text{orb}}} = \frac{q}{\sqrt{1+q}} \left[ \frac{1}{2} \frac{1}{r^{1/2}} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{dB_0}{dr} \right) \right] \quad (12)$$

(ただし  $B_0$  は Laplace coefficient)

となることを示した。また、Hirose and Osaki (1990) がリングを考えたことに対し、Lubow (1991) はこれを流体的に扱った。これについての詳しい議論は次のセクションで行う。

### 4.3 観測的な観点からの問題

前述の方法を用いて  $q$  を求めるためには  $\epsilon$  に用いる  $P_{\text{SH}}$  と  $P_{\text{orb}}$  が必要である。しかし、前章で明らかにしたように当時すでに  $P_{\text{SH}}$  は superoutburst を通じて変化することが知られていた。そのため、どの部分を  $q$  の見積りに使うべきかの問題がある。Patterson (1998) は進化の考察を行うために激変星の質量比を  $P_{\text{SH}}$  を用いて求めようと試みたが、この際矮新星の場合は  $P_{\text{SH}}$  として観測された値の平均的な値か、あるいはあまり観測がない場合にはアウトバーストから 4 日後のデータを採用したと述べている。Patterson (1998) はこの見積もりにおいて、円盤の半径は 3:1 共鳴が生じて tidal instability が引き起こされる半径と等しいと仮定している。実際には  $q$  の精度がそこまで高くないことや、後述のように理論的に得られる値が実際とはあまり合わないことから、より単純な表記が用いられる場合もあった。例えば、Patterson (2001) は  $\epsilon$  と  $q$  の両方が求められている天体から経験的に関係式を求め、 $\epsilon = 0.216q$  という値を求めている。Patterson et al. (2005) はこの式をさらに 2 次の式に修正して、 $\epsilon = 0.18q + 0.29q^2$  という式を与えた。





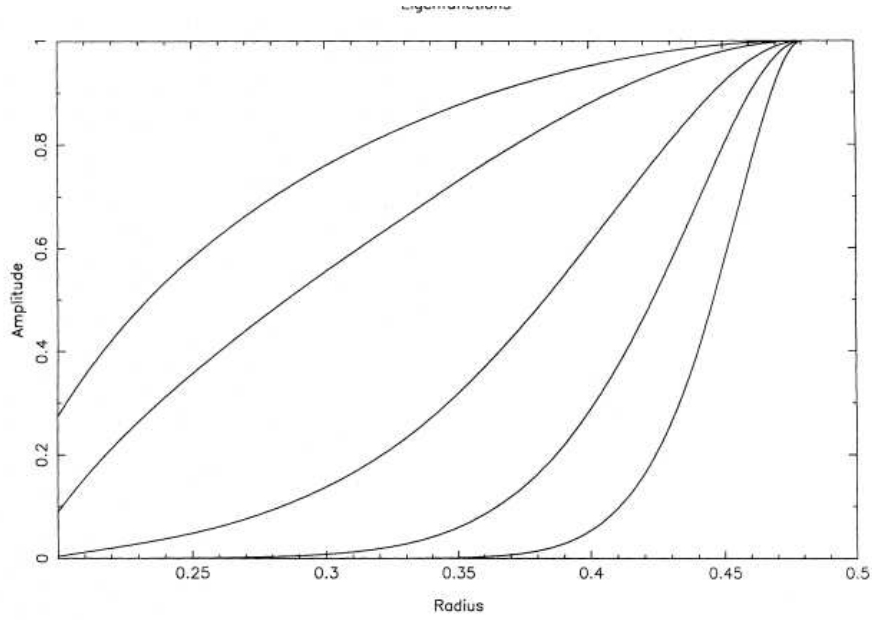


Figure 19: 数値計算によって得られた superhump の励起の半径方向の依存。各直線は音速の違いを示し、上にいくほど音速が小さな円盤を仮定している。(Hirose and Osaki (1993), Figure 2)

effectを加えなくてはならない、という問題点を提起した。この pressure effect は、円盤が 3:1 半径だけでなくより内側まで円から離れた運動をするようになることによって、各半径で precession の周期が異なっていること円盤全体の precession を減じる効果を示す。この pressure effect による運動の振動数は、3:1 共鳴半径で起こされた不安定性の場合、

$$-1.44\omega_{\text{beat}}\left[\frac{c}{\omega_{\text{beat}}d}\frac{1}{\tan i}\right]^2 \quad (13)$$

で表される。この式 (13) の中で、 $c$  は音速、 $d$  は連星間距離、 $i$  は励起されたモードの固有ピッチ角で、一般的には  $\tan i$  として 0.1 から 0.6 程度である。これらの項がいずれも正の値をとるものであることから、 $\omega_{\text{prec}} < 0$  であることが示される。

また、pressure effect は別の方法で捉えることもできる。Hirose and Osaki (1993) は、伴星の影響のある重力場中での円盤の eccentric modes を脈動変光星のモード解析と同様の固有値問題として解いた。ここでは、Hirose and Osaki (1993) による扱いの概要を紹介する [なお、式は無次元化してある。ここで示す式の一部は、Kato, Osaki(in prep.) の扱いによる。]

通常の中心力のみからなる重力場に潮汐力を及ぼす場があったとき、重力ポテンシャルの形は

$$\Psi = -\frac{GM_1}{r} + \Psi_{\text{tidal}} \quad (14)$$

という付加項  $\Psi_{\text{tidal}}$  がついた形で表される。このとき、 $\Psi_{\text{tidal}}$  はフーリエ級数の和

$$\Psi_{\text{tidal}} = \sum_{m=0}^{\infty} \phi_m(r) \exp[im(\psi - \Omega_{\text{orb}}t)] \quad (15)$$

として書くことができる。定常解を考えるために、天体力学で知られている Gauss の平均法 (Murray and Dermott 1999, p.254) を用いることができる。このとき、伴星の重力場は伴星の軌道に均等に広がっている伴星と同じ質量のリングと等価なものとしてみなすことができる。このとき、 $\Psi_{\text{tidal}}$  はリングの全周の微小成分が作る重力ポテンシャルの積分の形で書くことができる。

$$\Psi_{\text{tidal}} = \int_0^{2\pi} \frac{GM_2 d\phi}{2\pi[a^2 + r^2 - 2ra \cos(\phi - \phi_0)]^{-1/2}} \quad (16)$$

このとき、この式は Laplace 係数を使って

$$\Psi_{\text{tidal}} = -\frac{GM_2}{2a} b_{1/2}^{(0)} \left( \frac{r}{a} \right) \quad (17)$$

と書くことができる。ただしこのとき、

$$\frac{1}{2} b_{s/2}^{(j)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos(j\phi) d\phi}{(1 + r^2 - 2r \cos \phi)^{s/2}} \quad (18)$$

離心変形した円盤を考える場合、このような振動は 1 本腕振動として考えることができるので、円盤上での固有振動としてみなせる。なお、この式から得られた定常解はすでに離心変形した円盤の precession を表すものである。この式自体は 3:1 共鳴の成長を表すことはできない。3:1 共鳴により離心変形が成長する部分について議論する場合は、Hirose and Osaki (1990) のように、 $\Phi_{\text{tidal}}$  の非定常成分を考える必要がある。このとき、軸対称の円軌道を描いている円盤を考える。このような円盤の面密度は半径のみに依存すると考えることができるので、 $\Sigma_0 = \Sigma_0(r)$  とこれをおくことができる。円盤上の粒子の速度ベクトルを  $\mathbf{V}_0 = [0, r\Omega]$  とおく。

このとき  $\Omega$  は重力場と圧力勾配から

$$-r\Omega^2 = -\frac{d\Psi}{dr} - \frac{1}{\Sigma_0} \frac{dP_0}{dr} \quad (19)$$

と表される。これを無摂動の状態とする。これに、変数  $X$  について  $X_0(r) + X'(r) \exp(i(m\psi - \omega t))$  となるような摂動項を加える形で円盤上の流体を線形化して解くと、 $r$  方向と  $\theta$  方向の運動について、質量保存の式

$$i(m\Omega - \omega)\sigma + \frac{1}{r\Sigma_0} \frac{d(r\Sigma_0 u)}{dr} + \frac{im}{r} v = 0 \quad (20)$$

運動量保存の式

$$i(m\Omega - \omega)u - 2\Sigma v = -\frac{dp'}{dr} \quad (21)$$

エネルギー保存の式

$$i(m\Omega - \omega)v + \frac{\kappa^2}{2\Omega} u = \frac{-im}{r} p' \quad (22)$$

が導かれる (Hirose and Osaki 1993 (12)~(14))。なお、このとき  $\sigma$  は

$$\sigma = \left(\frac{\Sigma_0}{\Gamma_1 P_0}\right) p' = \frac{p'}{c_0^2} \quad (23)$$

である (Hirose and Osaki 1993 (15) 式)。ただし  $u, v$  は速度のそれぞれ  $r, \psi$  方向成分に加えられる摂動の大きさを  $\sigma$  は面密度の摂動を  $\Sigma$  で規格化したもの、 $p'$  は圧力の摂動の大きさを  $\Sigma$  で規格化したものである。また、 $c_0$  は音速であり、 $\kappa$  は半径  $r$  に対する epicyclic frequency である。このとき

$$\kappa^2 = 2\Omega \left[ 2\Omega + r \frac{d\Omega(r)}{dr} \right] \quad (24)$$

の関係がある。このとき、式 (21) を  $v$  について解いた式と、それを式 (22) に代入して  $u$  について解いた式について、円盤に加えられる precession の角速度が円盤上の粒子の角速度に比べて充分小さいとき、

$$v = \frac{i}{2} + \frac{1}{2\Omega} \frac{dp'}{dr} \quad (25)$$

$$[\omega - \omega_{\text{prec}}]u = -i\left(\frac{p'}{r} + \frac{1}{2} \frac{dp'}{dr}\right) \quad (26)$$

が得られる。ただし、 $\omega_{\text{prec}} = \Omega - \kappa$  である。このとき式 (20, 23, 25) から得られる式

$$\frac{1}{c_0^2} + \frac{1}{r\Sigma_0} \frac{d(r\Sigma_0 u)}{dr} - \frac{1}{2r} u + \frac{i}{2r\Omega} dp' dr = 0 \quad (27)$$

について、 $X = u$ ,  $Y = ip'$  として解くと、

$$\frac{dX}{dr} = \beta \frac{X}{r} + \left(\frac{\Omega}{c_0^2}\right) Y \quad (28)$$

$$\frac{dY}{dr} = \frac{2Y}{r} + 2[\omega - \omega_{prec}] X \quad (29)$$

という線形化した式が得られる。このとき、線形化された式は、補助変数  $X = r^\beta \tilde{X}$ ,  $Y = r^{-2} \tilde{Y}$  を用いて、連立微分方程式

$$\frac{d\tilde{X}}{dr} = (\Omega/c_0^2) r^{-2-\beta} \tilde{Y}, \quad (30)$$

$$\frac{d\tilde{Y}}{dr} = 2[\omega - \omega_{pr}(r)] r^{2+\beta} \tilde{X} \quad (31)$$

と書ける (Hirose and Osaki (1993) では (28)(29) 式に相当する)。なお、このとき時間に依存しない定常的な部分のみを調べるために式のうち実数成分のみを扱っている。また、表面密度の半径依存性を以下のようにおいた (Hirose and Osaki 1993, p598 文中式)。

$$\beta = -\frac{1}{2} - \frac{d \ln \Sigma_0}{d \ln r} = \frac{1}{4}. \quad (32)$$

脈動変光星を固有値問題として解いた場合、固有値  $\omega$  が脈動の周波数、固有関数  $\tilde{X}$  が脈動星における変位として得られる。この方法を円盤に応用した場合、固有値  $\omega$  が円盤全体の共通の  $\omega_{prec}$  を与え、固有関数  $\tilde{X}$  が eccentric mode の振幅を与える。そのため、この式を数値積分してやることによって半径  $r$  での歳差の角速度を求めることが可能となる。しかし、この式を数値積分するためにはいくつかの前提を与えなくてはならない。

まず、円盤はガス圧優勢の標準円盤と仮定する。そのため、音速の半径依存性は以下のようにとることができる (Hirose and Osaki 1993(40) 式)。

$$c_0^2 = (c_{0,\text{outer}}^2)^{-3/4} \quad (33)$$

半径に対する圧力の依存性は下のような式で前提する (Hirose and Osaki 1993 (39) 式)。

$$\frac{d \ln P_0}{d \ln r} = -\frac{3}{2} \quad (34)$$

また境界条件として、円盤の外縁での  $\tilde{X}$  と  $\tilde{Y}$  を  $\tilde{X} = 1$  and  $\tilde{Y} = 0$  とし、円盤の内縁で

$$\frac{d\tilde{X}}{dr} = \sqrt{\frac{2\Omega(\omega - \omega_{\text{pr}})}{c_o^2}} \tilde{X} \quad (35)$$

が満たされるものとする (Hirose and Osaki 1993 (42) 式。実際には内縁を定義することに問題があるため、 $r = 0.2$  を内縁としている)。円盤のように半径方向に広がりを持っていない半径  $r$  のリングでは、 $\omega_{\text{pr}}$  は局所の歳差角速度で次の式で与えられる (Osaki 1985, Hirose and Osaki 1990)。

$$\begin{aligned} \omega_{\text{pr}} &= \frac{q}{\sqrt{1+q}} \left[ \frac{1}{4} \frac{1}{\sqrt{r}} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{db_{1/2}^{(0)}}{dr} \right) \right] \\ &= \frac{q}{\sqrt{1+q}} \left[ \frac{1}{4} \frac{1}{\sqrt{r}} b_{3/2}^{(1)} \right]. \end{aligned} \quad (36)$$

局所公転角速度は、Hirose and Osaki (1993) の (37) 式のようにして

$$\Omega^2 = \frac{1}{1+q} r^{-3} - \frac{q}{1+q} \frac{dB_0}{dr} + \frac{1}{\Gamma_1} \frac{d \ln P_0}{d \ln r} r^{-11/4} \quad (37)$$

として書くことができる。

また、計算の際の利便性を考えて  $\kappa$  と  $\omega_{\text{prec}}$  の関係は Hirose and Osaki (1993) (36) 式にあるような

$$r^3 \kappa^2 = \frac{d}{dr} (r^4 \Omega^2) \quad (38)$$

という形で書き直しておく。これらの条件下で、式 (30) と式 (31) を数値的に解くと、得られた固有値、固有関数は、円盤全体の歳差角速度と eccentric mode の半径依存性を示すものとなる。Figure 19 はそのような eccentric mode の半径依存性の図である。ここで、pressure effect は音速の形で現れており、 $c_0 = 0$  が pressure effect のない場合に相当する。実際に Hirose and Osaki (1993) の Table 1,2 の  $c_0 = 0$  と力学的な歳差角速度の理論値 (式 (12)) に一致する。 $c_0 = 0.1$  が円盤の scale height が  $H/r \simeq 0.1$  に相当する。

このような扱いによって、円盤全体の歳差角速度は Hirose and Osaki (1993) における (32) 式、

$$\omega = \frac{\int_{r_1}^{R_d} \omega_{\text{pr}}(r) g(r) |\tilde{X}|^2 dr - \int_{r_1}^{R_d} f(r) |d\tilde{X}/dr|^2 dr}{\int_{r_1}^{R_d} g(r) |\tilde{X}|^2 dr} \quad (39)$$

となる。これは局所の歳差角速度を eccentric mode の半径依存性の重みを (重み関数とともに) 掛けて平均化したもので表されることがわかる。この式のうち、分子の第1項はリングの場合を仮定したときに生じる力学的な歳差運動を半径方向に平均化したものであるが、第2項は半径方向での eccentric mode の強まりの差分によって圧力勾配が生じているために歳差運動にブレーキがかかっているということを示す。この式は Lubow (1992a) が流体力学的に円盤の数値計算をして求めた表式に対応するものだが、より複雑であること示す。Lubow (1992a) は円盤の角速度成分  $\Omega$  を、歳差運動によるもの  $\Omega_{\text{prec}}$ 、円盤内部での半径方向の圧力によるもの  $\Omega_{\text{pr}}$ 、および円盤の中の波同士の相互作用によるもの  $\Omega_{\text{stress}}$  に分けられるものとしている。

この式から得られた積分は第1項が第2項より一桁程度大きくなるため、円盤の歳差を概観するためには第1項を主に評価すればよい。特に、円盤の温度が充分低い場合や pressure effect が効いていない状態では eccentric mode の半径依存性が円盤の外縁部分のみに限局されておりこのときは歳差角速度はもっとも大きくなる。pressure effect が効いている状態では、eccentric mode の半径依存性が内側まで広がっており、このような状態では歳差角速度はより小さい値をとる (Figure 20)。

## 5.2 観測との比較 pressure effect 効果の精密化

Murray (1998) はさまざまなパラメータの円盤を数値実験によってシミュレーションすることによって、 $q$  以外のパラメータが beat cycle に強く影響を与えていることを示した。その中で、pressure effect を与えるパラメータである  $c/\omega_{\text{beatd}}$  を3倍にすることによって  $\epsilon$  が 5.3% から 3.6% へと減少するという結果を得ている。また、この数値実験の中で再現された superhump には stage A-B transition と解釈しうる周期変化が見られた (Figure 21) が、これについて特に解釈などはなされていなかった。Murray 2000 は数値実験の結果と Patterson (1998) でまとめられている  $P_{\text{orb}}$  と  $\epsilon$  の関係について照らし合わせて、pressure effect の存在を仮定しないと理論的な予想と実際の観測的に得られている結果がうまく合わないという問題点を指摘した。また、Murray et al. (2000) は pressure effect が存在しないと仮定して superoutburst を数値的に再現した場合と、存在すると仮定して同様の計算を行った場合で  $P_{\text{orb}}$  と  $\epsilon$  の理論的な関係がどのように変化するかを比べた。食があるために質量比が既に求められている OY Car, HT Cas, Z Cha を元にして見積もった pressure effect の大きさが他の矮新星の superoutburst でも同様にして影響するという仮定をして pressure effect を計算に加えた結果、理論的に求められた  $P_{\text{orb}}$  と  $\epsilon$  の関係は当時 superhump excess が判明しているすべての系が誤差項の中におさまるという結果を得た。一方で pressure effect の存在を無視して計算した場合、ほぼすべての系において理論的に再現できた  $\epsilon$  の値よりも小さな  $\epsilon$  という結果になった (Figure 22)。

Pearson (2006) は、pressure effect を含めた数値計算式を Patterson et al. (2005) がそれまで与えてきたような多項式で表される  $\epsilon$  と  $q$  の関係式を解析的に求められた式

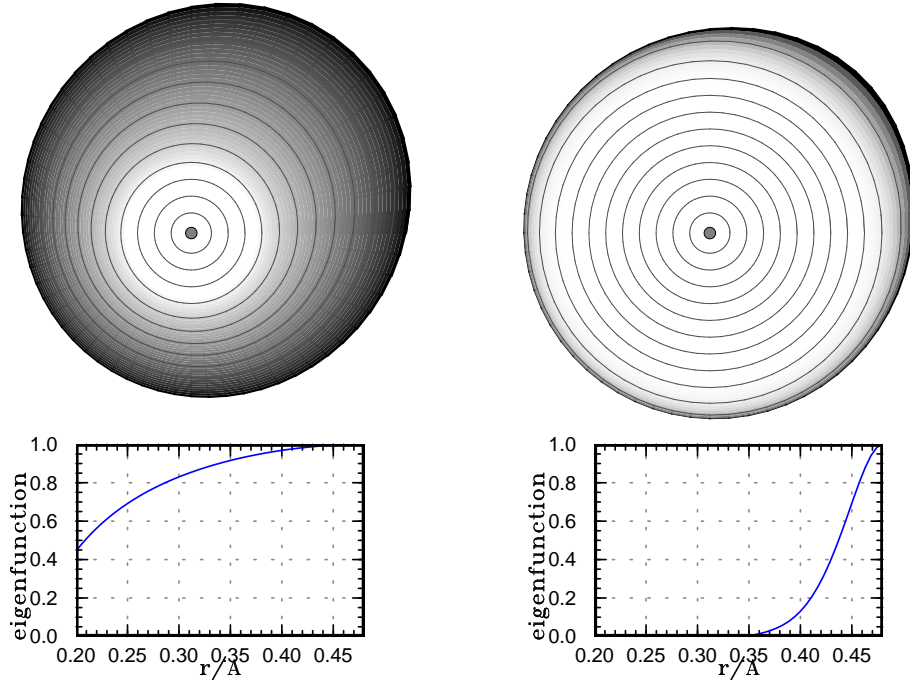


Figure 20: 数値計算によって求められた、半径方向の eccentricity の変化。右図が eccentric wave が外縁部に局在している場合、左図はそれが内側まで広がっている場合。文中の式 (30、31) を解くことによって得たものである。(Osaki and Kato (2013b), Figure 17)

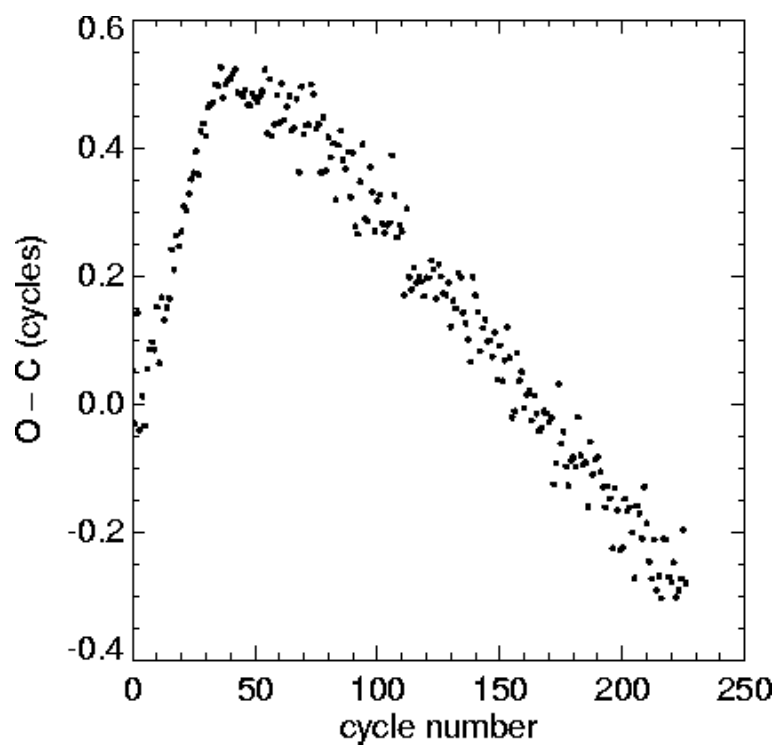


Figure 21: Murray (1998) の数値実験で再現した superhump についての  $O - C$  図。stage A-B transition を疑われる周期変動が認められた。(Murray (1998), Figure 2)



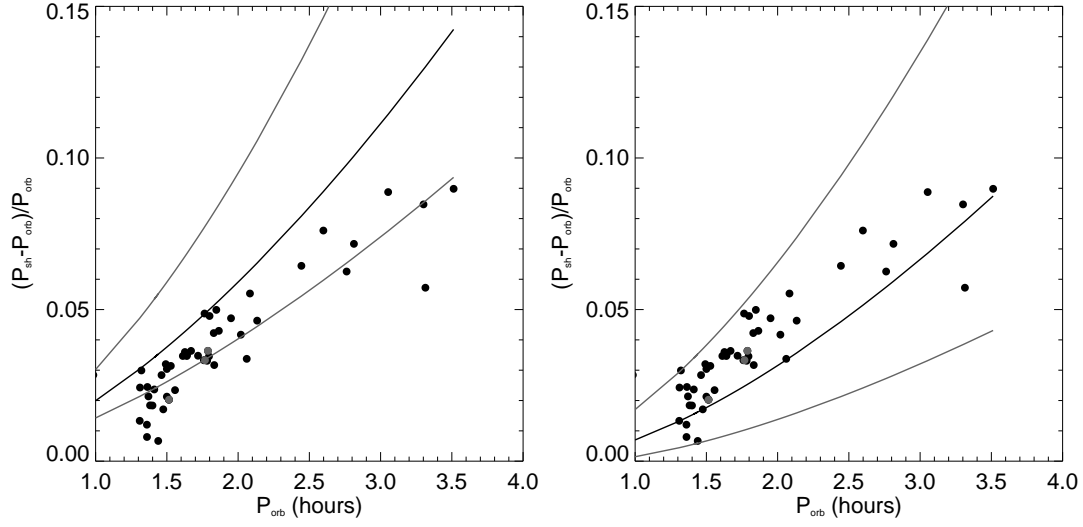


Figure 22: 理論的に予測される  $-\epsilon$  の関係式と、実際の天体の分布との差異。左の図は pressure effect を考慮しないで計算した関係式、右の図は pressure effect を考慮して計算した関係式。(Murray et al. (2000), Figure 3, 4)

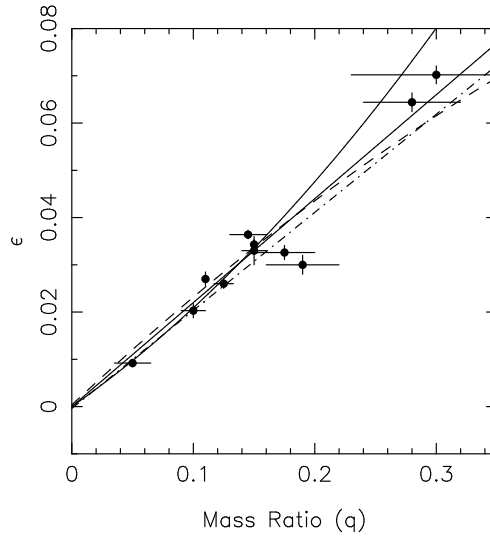


Figure 23:  $\epsilon$  と  $q$  の関係についての近似式。実線が Patterson et al. (2005) にあげられている近似式、点線が Pearson (2006) で見積もられている近似式。(Pearson (2006), Figure 7)

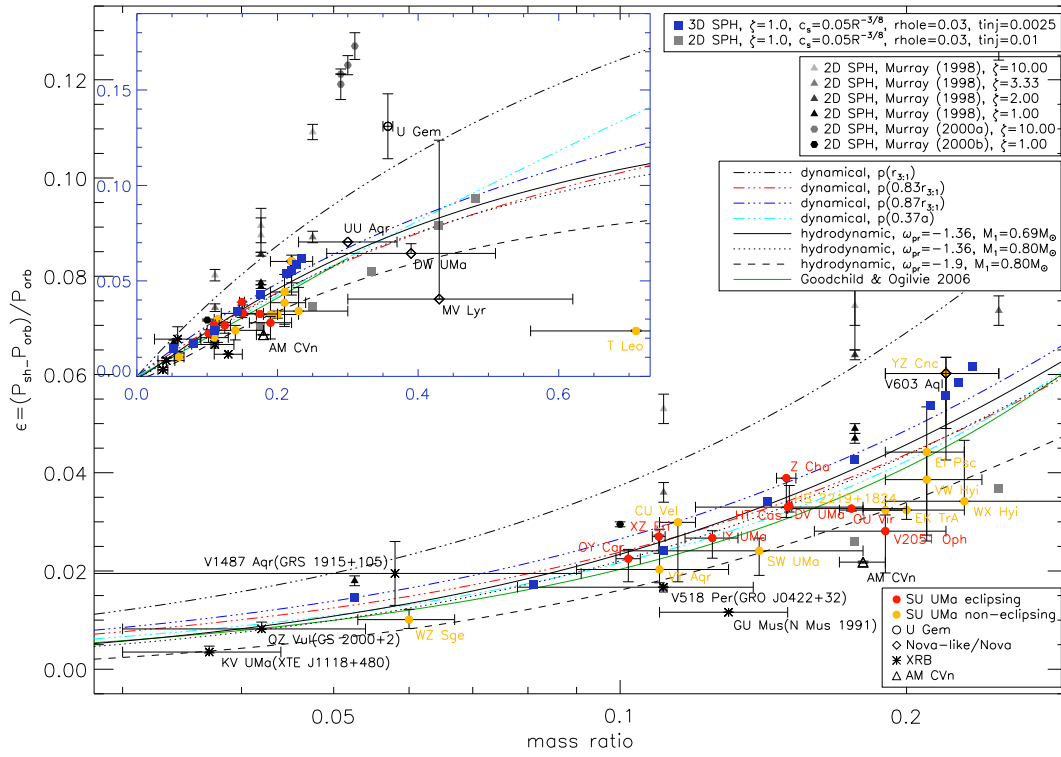


Figure 24: さまざまなシミュレーション手法による pressure effect の再現。 (Smith et al. (2007a), Figure 14)

をマクローリン展開することによって得ようと試みた。これによって、 $0.01 < q < 0.4$  の範囲について  $\epsilon = 3.5 \times 10^{-4} + 0.24q - 0.12q^2$  という近似式を得た。同様の試みは同時期に Goodchild and Ogilvie (2006) によってもなされており、 $-4.1 \times 10^{-4} + 0.2076q$  という式を得た。これらのさまざまなやり方によって近似された関係式と実際の天体における  $\epsilon$  と  $q$  を Figure 23 に示す。Pearson (2006) は superoutburst が進むにつれて円盤の温度が低下することによって pressure effect が弱まることにより superhump 周期が増加する可能性を示唆したものの、これが superoutburst 中の  $\epsilon$  の減少と合わないという議論をしておりまだ Patterson et al. (1993a) の影響が強く残っていたと考えられる。また、Pearson (2006) は pressure effect を考慮しないとすると、観測結果と数値実験は 3:1 ではなく 4:1 共鳴半径での潮汐不安定性が引き起こしていると解釈した方がよく合う可能性があるとして述べた。

Goodchild and Ogilvie (2006) はまた Hirose and Osaki (1993) が線形化した微分方程式の実数部分のみを扱い、定常的な現象のみを扱ったことに対して、離心率の項を複素数として表して虚数部分を扱うことによって時間発展についても数値的に解き、superoutburst 中のモード成長を扱うことも試みた。彼らは数値実験の結果やはり superhump が起きている円盤の歳差の角速度は理論的に予測される値よりも小さいものとなることを示し、これは 3:1 共鳴半径より少し内側でもっとも強くモードが励起されるためであるという解釈を示した。

このあと Smith et al. (2007b) は 2 次元と 3 次元両方の SPH シミュレーションを行い、3 次元シミュレーションがよく pressure effect を含めた  $\epsilon$  の値を再現することができることを示した (Figure 24)。このあと、円盤における SPH シミュレーションに関する研究、特に pressure effect についての研究はあまりなされていないが、従来 superhump の現象を再現するのに SPH を使った場合しか再現することができなかったのに対して Kley et al. (2008) は差分法を用いて superhump の成長を再現したことが注目される。それまでは、差分法で流体計算を行って tidal instability をうまく再現することはできていなかった (Heemskerk 1994; Stehle 1999; Kornet and Rozyczka 2000)。ただし、Kley et al. (2008) では  $q > 0.3$  でも離心円盤が成長したり、pressure effect が効くようになった stage B に相当する段階で負の  $\epsilon$  が現れるなど、実際の観測と見合わない結果もいくつか見られることと、その後同じように差分法によって superhump を再現した研究が現れていないことなどから、今後のさらなる研究が期待される。

### 5.3 pressure effect を考慮しない質量比 $q$ 見積り手法

これらの研究では、まだ superhump 周期における stage の変化の存在が意識されていなかったためにいずれも平均 superhump 周期などが用いられていた。しかし、その後 Kato et al. (2009) で superoutburst における stage の違いが認識されるようになり、 $q$  を算出するための  $\epsilon$  としてどの段階のものを採用するべきなのかという問題

が出た。Kato et al. (2009)では、stage A, B, Cの違いの存在について報告したあとで理論的に予想される  $\epsilon$  と  $q$  の関係と実際に観測されている stage B の開始時の  $\epsilon$  と  $q$  の関係のずれを見出している (Figure 25)。また、stage B から stage C に切り替わる直前の周期を採用すると理論式とよく一致しているという結果を得た。しかし、この結果は pressure effect を考慮していないものであった。

## 6 観測手法の発展

### 6.1 SDSS の果たした役割

2000 年頃から、Sloan Sky Digital Survey(以下、SDSS サーベイと表記する)によるサーベイがなされるようになり、激変星の新しい一群の天体が発見された (Szkody et al., 2002; Szkody et al., 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2009, 2011)。このサーベイは本来、多色の撮像サーベイを行うことによってクエーサーの発見を目的とするものであったが、それ以外にも副産物として多くの激変星が発見されることになった。これは、このサーベイは分光観測が同時に行われていたためにスペクトルの特徴などから激変星であることが明らかにされたところが多い。

この SDSS サーベイによって発見された激変星は、激変星の進化の観点から従来よくわかっていないとされていた部分に大きな光を投げかけるきっかけとなった。Gänsicke et al. (2009) は SDSS サーベイによって激変星として検出され、分光観測がなされている天体 137 天体について、正確な軌道周期を見積もることによって激変星の軌道周期の分布について研究した。これらの天体のうち 92 天体は SDSS サーベイによって新たに発見された天体である。その結果、これらの SDSS サーベイによって発見された激変星の軌道周期の分布は、従来知られていた激変星について得られていた分布から大きく異なっていることが明らかになった。従来発見されていた激変星は、軌道周期が比較的長い系が多かった。しかし、激変星の進化の観点からは、このような分布ではなく、理論的な周期の最小値である period minimum 付近に多くの数の激変星が集中して存在することが予測されている。しかし、このような period minimum 付近の軌道周期を持つ矮新星は 00 年代半ばに至るまでほとんど発見されておらず、激変星に関する謎の一つとされてきた。

Gänsicke et al. (2009) の研究は、今回、SDSS サーベイによって発見された矮新星の多くがこの period minimum 近辺の軌道周期を持つことから (Figure 26)、これらの理論的に予想されていたとおりに実際の激変星が分布していることが明らかになった。このような period minimum 付近の激変星は質量輸送率が低いことと円盤の粘性  $\alpha$  が小さいことから熱的不安定性が生じにくく、このために増光頻度が非常に小さくなって検出されにくくなるためにこれまであまり発見されてこなかったと考えられる。また、Kato et al. (2012b) は SDSS の色分布から矮新星の軌道周期

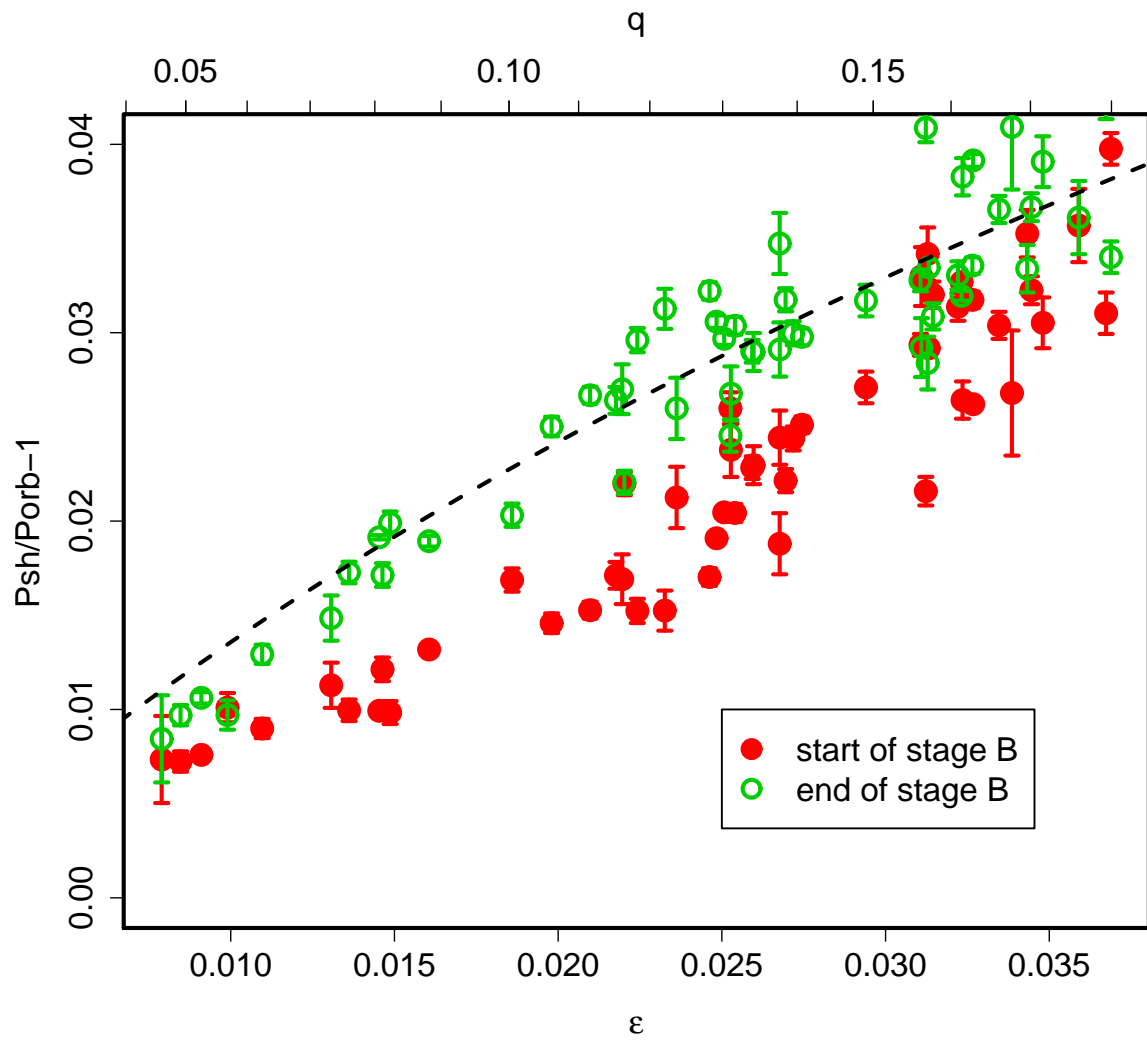


Figure 25:  $\epsilon$ と軌道周期の関係。塗りつぶされた円は stage B 開始時の superhump 周期を採用して  $q$  を見積もった場合で、塗りつぶされていない円は stage B 終了時の superhump 周期を採用して  $q$  を見積もった場合。(Kato et al. (2009), Figure 22)

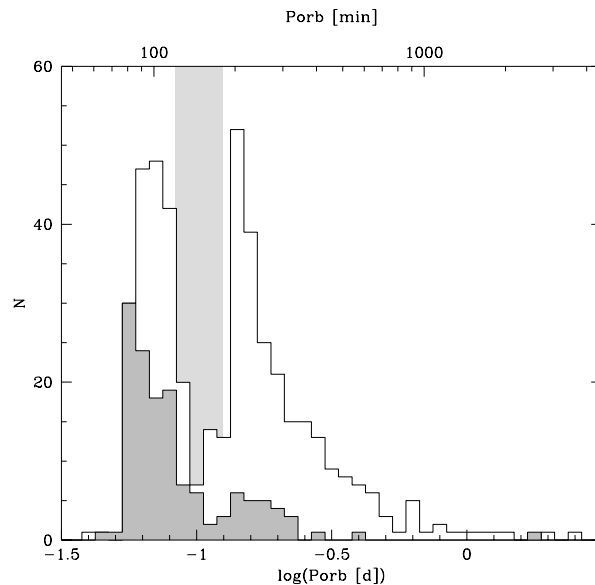


Figure 26: 発見されている激変星の軌道周期の分布。灰色で塗られたヒストグラムはSDSSサーベイ以前に Ritter and Kolb (2003) に収録されている矮新星の軌道周期をもとにして作成されたもので、塗られていないヒストグラムはSDSSサーベイによって発見された天体を含めたもの。なお、軌道周期 100 分付近に網掛けにされている部分は period gap と呼ばれる矮新星の発見数が少ない区間を示す。SU UMa 型矮新星は主にこれより短い部分に集中して存在する。(Gänsicke et al. (2009), Figure 2 左図)

を推測することが可能であり、これを用いて増光が報告された新天体が軌道周期の短い系であるかどうかを予測することが可能となった。

## 6.2 Kepler による CV 観測

Kepler 衛星は、新しい太陽系外惑星を探索するためにはくちょう座とこと座にまたがる区画にある天体を継続的に測光観測することを本来の目的として 2009 年に打ち上げられたものである (Borucki et al., 2010; Koch et al., 2010)。この観測領域は銀河面に近くいくつかの激変星が領域内に含まれていた。特に、この領域に含まれていた V344 Lyr と V1504 Cyg という二つの SU UMa 型矮新星が含まれていたことは、地上では得ることの出来ない時間精度で SU UMa 型矮新星の光度曲線を得ることを可能にした。このデータを解析することによって、Still et al. (2010) は V344 Lyr が静穏時にも positive superhump を示していることがあることを見出し、Cannizzo

et al. (2010) はここで得られた光度曲線を説明するためのモデルとして熱潮汐不安定性を考えない superoutburst のメカニズムを提案した。なお、この考え方はのちに Osaki and Kato (2013a) によって否定されている。さらに Wood et al. (2011) は negative superhump が V344 Lyr に存在していることを報告した。その後、Cannizzo et al. (2012) は V344 Lyr に加えて、V1504 Cyg についての光度曲線も解析、研究を行った。Osaki and Kato 2013a は V344 Lyr と V1504 Cyg の光度曲線、特に negative superhump の周期変化を追うことによって、これらの光度曲線が SU UMa 型矮新星の増光メカニズムが熱潮汐不安定性によるものであることを示唆していることを明かにした (本論文 8.1 章を参照)。

また、これらの既知の天体に加えて Kepler 衛星の観測により新たに発見された激変星も存在する。Kato and Osaki (2013a) は Kepler 衛星の観測領域の既知の矮新星 2 天体の他に新たに発見された矮新星 1 天体について光度曲線を解析し、その振る舞いについて報告している。また Kato and Maehara (2013) は Kepler 領域に含まれていた新発見の新星類似型の天体について解析を行い、軌道周期に比べて非常に長い positive superhump を示す系であることを示した。

### 6.3 その他のサーベイ観測

この他にも近年、新たな激変星の発見をもたらすいくつかのサーベイが行われている。これらの多くは変光星の発見そのものが主目的ではないが、多くの激変星をはじめとした天体の発見につながっているものである。また、ASAS(All Sky Automated Survey, Pojmański (2002)) は焦点距離の短いレンズを用いた広視野撮影によって空の広い範囲をモニターすることで、およそ 14 等より明るい天体の明るさの変動を追うためのサーベイ観測計画である。この計画は 1997 年から本格的に始動したもので、おもに南天の変光星を中心にして継続的なモニターを行っている。極限等級が比較的浅いことからこの望遠鏡によって発見された天体は食変光星などが中心だったが、いくつかの新星の他、明るい矮新星の発見も報告されるようになった。これらの新天体の中には、WZ Sge 型である ASAS J160048-4846.2(Imada and Monard, 2006; Soejima et al., 2009) や、ASAS J002511+1217.2(Golovin et al., 2005; Templeton et al., 2006) といった天体は、このサーベイによって発見された明るい WZ Sge 型矮新星である。前者は superhump 周期の superoutburst 中の変化の存在が考えられるきっかけとなった天体の一つである。また、2013 年に ASAS-SN(All-Sky Automated Survey for Supernovae, Shappee et al. 2013) というプロジェクトも開始された。この計画には ASAS の関係者も含まれているが、直接 ASAS とつながりがあるわけではない。このプロジェクトは、4 台の 14cm の自動望遠鏡を用いて空の広範囲をサーベイし、およそ 17 等までの新天体をさぐるための計画である。これらの望遠鏡は 4.5 度四方の視野を持ち、一日に 10000 度四方の天空をサーベイすることが可能である。このサーベイはその名前にも含まれているように超新星の発見を第一の目的と

しており、多くの超新星を既に発見している。しかし、掃天範囲が広いことや限界等級が暗いことにより多くの新しい矮新星の発見もこのサーベイによってなされることとなった。例えば ASAS-SN13ao、ASASSN-13as といったサーベイ開始直後に発見された新たな SU UMa 矮新星をはじめとして、ASASSN-13ax はこのサーベイによって発見された WZ Sge 型矮新星である (Kato et al., 2013b)。

CSS (Catalina Realtime Sky Survey, Drake et al. 2009) はアリゾナ大学が中心となっていて行っている全天サーベイである。このサーベイは地球近傍の小惑星をはじめとした天体、特に地球に衝突する可能性のある天体を発見することを本来の目的として 3 箇所の天文台に設置された 0.4m から 1.5m の自動望遠鏡を用いて行われているものである。しかし、小惑星以外にも多くの超新星や活動銀河、そして矮新星といった突発的天体も発見している。OT J102146.4+234926 は Catalina Sky Survey によって 2006 年に発見された矮新星で、当時は Var Leo 06 と呼ばれた (Christensen, 2006; Ayani and Kato, 2006)。その後の観測によって superhump がとらえられ、WZ Sge 型矮新星の一つであることは明らかになった Uemura et al. (2008); Golovin et al. (2007)。

## 7 Negative Superhump

### 7.1 negative superhump の発見

positive superhump の他に、一部の激変星では negative superhump と呼ばれる現象がみられることが知られている。positive superhump が軌道周期より数%長い周期の変動であることに対して、negative superhump は軌道周期より数%短い変動である。(Udalski 1988; Harvey et al. 1995; Ringwald et al. 2012) このタイプの変動は、SU UMa 型矮新星に限らず、他の多くの激変星でも観測されている。

negative superhump は TV Col で初めて報告された (Motch, 1981)。Motch (1981) はこの天体を X 線で観測した際に、5.2 時間と 4 日の 2 種類の変動がみられると報告した。しかし、のちに Hutchings et al. (1981) はこの天体の分光観測を行うことによってこの星の軌道周期が 5.5 時間であることを指摘した。さらに、Bonnet-Bidaud et al. (1985) が Motch (1981) のデータを再解析した結果 5.2 時間の周期だけでなく 5.5 時間の変動が見られ、当初見られた 4 日の変動は 5.2 時間の周期と 5.5 時間の周期の変動の共鳴によるものであると結論づけた。このことから、TV Col には軌道周期より短い変動を示すことが示唆された。

その後、新星類似型の TT Ari で 24 年分の測光データを解析したところ、軌道周期の 3.3 日ともう一つの周期として 3.2 日の周期が Fourier 解析で見出された (Semeniuk et al., 1987a,b)。この他に、この二つの周期の beat 周期に対応すると思われる 4 日の変動もともに検出されたため、TV Col と同様に軌道周期より短い変動が存在す



ることが示唆された。さらに 1916 年の新星として知られる V603 Aql と (Patterson et al., 1993b, 1997)、SU UMa 型矮新星の V503 Cyg (Harvey et al., 1995) で同様の周期の信号が見られることが報告され、軌道周期より短い周期での変動の存在が明らかになった。通常の superhump と異なり、負の値の superhump excess を持つことから、Harvey et al. (1995) によって negative superhump と名づけられた。総じて、negative superhump は主に質量輸送率の高い系で観測されていることが知られている。特に、常に円盤の温度が高い状態にある系 (新星類似型) で多く観測されている。また、いくつかの SU UMa 型矮新星でも観測されているが、いずれもアウトバースト間隔が短く、質量輸送率が高い系でよくみられる (Harvey et al. (1995); Patterson et al. 1995; Gao et al. 1999; Pavlenko et al. 2010)。軌道周期が短く、 $q$  が小さい系のみで観測されている positive superhump とは異なり、negative superhump は軌道周期の長い系でも観測されている (e.g. TV Col の機動周期は 5.5h)。

## 7.2 歳差角速度

このような変動がどのように起こるか、という機構を説明するために、Bonnet-Bidaud et al. (1985) は公転運動と反対方向に歳差運動を示す円盤の存在がかかわっているのではないかという仮説を示した。このような考え方は X 線連星で TV Col と同様に軌道周期より短い変動がすでに知られており、そのような変動を説明するためのメカニズムとして提唱されていたものである (HZ Her: Katz 1973; SS433: citelei84v1343aql)。Gerend and Boynton (1976) は X 線連星の HZ Her でこのような変動が観測されることを説明するために、公転面から傾いた円盤が存在するために伴星を隠す面積が変化し、そのために生じる変動なのだろうと推測した。

negative superhump の起源として、現在広く信じられているものは、公転面上から傾いて円盤が形成されているために円盤が公転方向とは逆向きに歳差運動を示すというものである (Wood et al., 2000)。公転面から外れた円盤は伴星からの潮汐力により公転面に垂直方向以外の角運動量を持つようになるため、このような歳差が生じる。ただし、円盤が単純に傾いているとする見方の他に、円盤が捻れているために同様の現象が引き起こされるとする見方もある (Murray et al., 2002)。ただし、公転面上から外れた円盤が形成されることによって引き起こされるという見方は共通している。

またこれは、ある軌道半径で公転する粒子に公転面に対して垂直の力を加えたときの摂動として考えることもできる。positive superhump の成因のところでも述べたのと同様に、中心天体のみを考えた場合このような摂動が加えられると単振動状に元の場所の周囲を振動し、ちょうど 1 公転周期で元に戻る。positive superhump の場合軌道半径についての振動だったのが、今回は軌道に対する垂直方向の振動となる。しかし、今回の場合さらに伴星としてもう一つの天体を加えると、垂直方向に元の位置に戻る向きの力がより強められるために受ける重力は半径の 2 乗より大

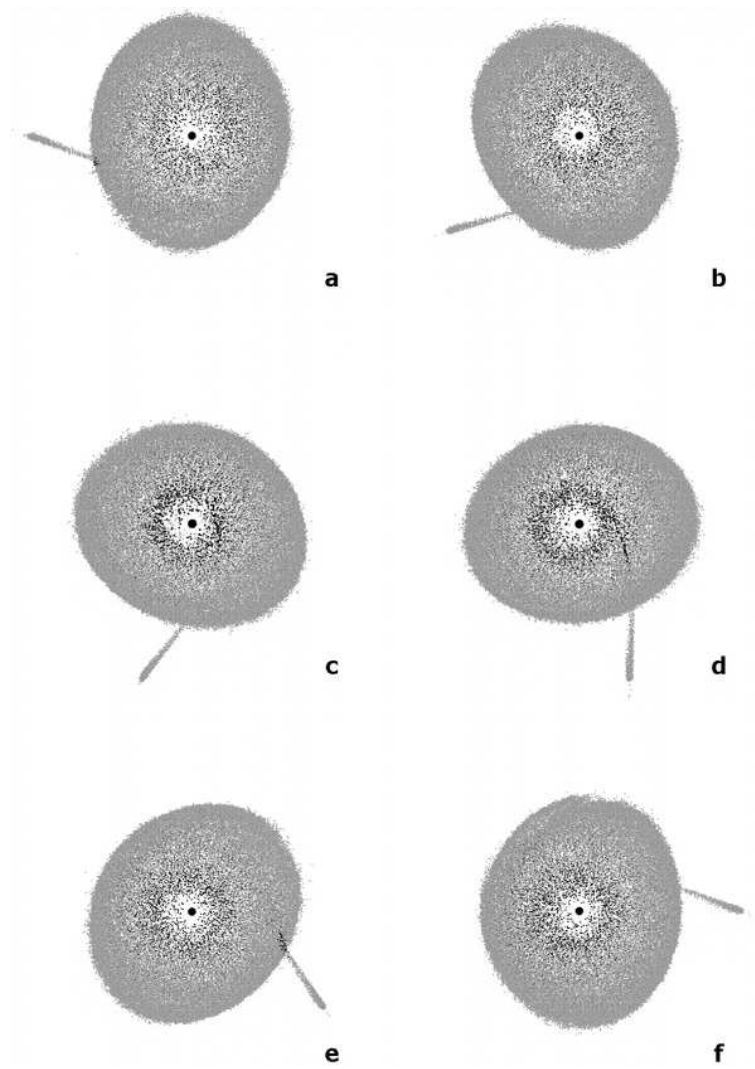


Figure 27: 数値計算によって再現された、傾いた円盤に対する accretion flow の流れ込む半径が変化することによって negative superhump が円盤上で引き起こされるメカニズム。(Wood and Burke (2007), Figure 2)

きくなる。そのため、垂直方向の元の位置が最初と同じ位置に戻るのに要する長さは1公転周期より少し短くなる。これを円盤として考えたとき、軌道面から tilt した円盤が公転方向と逆向きに歳差するという描像で書き表される。

これをより厳密な問題として考えるために、まず、質点運動の場合を考える。この質点は天体力学的に見ると、Kepler 回転をしていると考えることができるが、この Kepler 回転をしている質点が半径方向に摂動を加えられた場合、公転運動に加えて半径方向の単振動が引き起こされる。そのため粒子は周転円運動をする。同様に、公転面に対して垂直方向に摂動を加えられた場合、垂直方向の単振動に起因する周転円運動が引き起こされる。このような場合、negative superhump の歳差は昇交点経度、positive superhump の歳差は近星点経度の、それぞれ永年摂動として考えることができる。このとき、それぞれの時間微分は離心率とともに 0 に充分小さいとして

$$\frac{d\tilde{\omega}}{dt} = n \left( \frac{R_d}{a} \right) q [2C_1 + C_3 \frac{e'}{e} \cos(\tilde{\omega} - \tilde{\omega}')] \quad (40)$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = n \left( \frac{R_d}{a} \right) q \frac{C_2}{2} \quad (41)$$

(ただし  $C_0, C_1, C_2$  は Laplace coefficient に関する係数。  $C_0, C_1 > 0, C_2 < 0$ )  
このとき、 $e \gg e'$  を仮定して積分するとき、

$$\tilde{\omega} = \tilde{\omega}_0 + 2n \left( \frac{R_d}{a} \right) q C_1 t \quad (42)$$

$$\Omega = \Omega_0 + n/2 \left( \frac{R_d}{a} \right) q C_2 t \quad (43)$$

という式が得られる。このとき  $C_0, C_1, C_2$  の符号から、 $\tilde{\omega}$  の変化する方向と  $\Omega$  の変化する方向は反対方向である。また、これらの係数には  $2C_1 = -\frac{C_2}{2}$  の関係があるため、 $t$  に関する係数は符号が違いますが絶対値は等しい。 $t$  の係数は軌道の半径と質量比に依存していることから、この質点が同じ半径のところに形成されたリングの場合でも同じことがいえる。このことから、質点ないしはリングの場合、negative superhump は positive superhump と同じ絶対値の  $\epsilon^*$  を持つことが予想される。

しかし円盤の場合を考えると、異なった半径で異なった precession rate を示すために円盤全体としての precession rate は異なってくる。このようなときに剛体として円盤が precession するか、差動 precession をしているかという問題は議論があった。

剛体として precession をする一般的な円盤を考えたとき、

$$\omega_{\text{prec}} = -\frac{3}{4} \frac{GM_2}{A^3} \frac{\int \Sigma \Omega r^3 dr}{\int \Sigma r^3 dr} \cos \delta \quad (44)$$

このとき、円盤上の半径に precession 周期が依存することを考えると、半径方向の物質分布  $\Sigma(r)$  によってこの値は大きく変化する。 $\Sigma = \Sigma_0(r/R_d)^n$  と円盤状の面密度関数を与えると、上の式は解析的に解くことができ

$$\frac{P_{orb}}{P_{prec}} = -\frac{3}{4} \frac{2.5+n}{4+n} \frac{q}{\sqrt{1+q}} \left(\frac{R_d}{A}\right)^{3/2} \cos\delta \quad (45)$$

このとき、 $3(2.5+n)/4(4+n)$  のファクターについて、 $n = 1/2$  を採用すると、

$$\frac{P_{orb}}{P_{prec}} = -\frac{3}{7} q \left(\frac{1}{\sqrt{1+q}}\right) \left(\frac{R_d}{A}\right)^{3/2} \cos\delta \quad (46)$$

と書くことができる。

現在では、円盤の投影面積の変化よりも accretion spot が形成される半径が変化することのほうが negative superhump に対する寄与として有力視なされている。円盤が公転面と同一平面に形成されている場合、伴星からの降着流は円盤の外縁部に形成されるが、公転面と円盤が一致しない場合伴星との位置関係によっては accretion flow はより内側まで届く。hot spot がより内側に形成される場合、hot spot で解放される位置エネルギーはより大きくなる。円盤が歳差運動しているため、この hot spot の明るさは連星としての公転周期より短い周期での変動となる。これが negative superhump が引き起こされるメカニズムと考えられる (Figure 27)。

### 7.3 励起機構の問題

negative superhump の起源が公転面と一致しない円盤とそこに降着する物質にあることは古くから考えられて来た (Patterson et al., 1993b)。しかし、このような現象がどのような機構で引き起こされるかについてはあまりはっきりしていなかった。このような円盤の tilt は激変星以外の天体でもしばしばみられる現象であるため、それらの系においても機構が考えられてきた。例えば X 線連星の場合、重い伴星を持つ系では伴星と主星による潮汐効果により垂直方向に不安定性が発生するという考え方 (Lubow et al., 1993) や中心天体からの輻射圧によって円盤の形状がねじれる効果により公転面から外れるという不安定性の存在 (Pringle, 1996)、あるいは相対論的效果などが提唱されている。また伴星の軌道に対して円盤が大きく傾いている場合、伴星からの潮汐力によって直接的に形状のねじれが励起されるという考え方も提唱されている。しかし、矮新星の場合中心が白色矮星であるためあまり大きな輻射圧が生じることは考えにくく、高質量 X 線連星のように大質量の伴星を持っている系もないためにこのような機構も考えにくい。

激変星の場合、このような negative superhump が磁場を持つ白色矮星を持つ系である TV Col で報告されていることから (Barrett et al., 1988)、磁場の存在によ

てこのような円盤の傾きが引き起こされるのではないかという見方や、中心星が強い磁場を持っている系の場合、円盤の形成される軸と中心星の spin の軸が一致しないために形成された disk が歪むのではないかという説も唱えられている (Kondo et al., 1983; Lubow, 2010)。しかし、これらの説のうち、引き起こされた円盤の傾きが不安定性として成長する原因として解釈できるものは多くない。現在、次の3つの原因が円盤の傾きを成長させる要因として知られている。

- Lubow (1992b) は positive superhump を引き起こす 3:1 共鳴によって離心変形の不安定性だけでなく円盤の軌道面からの傾きの不安定性も誘発するのではないかという説を唱えた。この考え方では不安定性は成長するため、negative superhump を示すようになる系の存在を説明するものになるかのように思われた。しかし、この Murray and Armitage (1998) は公転面から傾いた円盤が negative superhump を再現することができることを数値計算から示したが、3:1 共鳴によって引き起こされる不安定性によって円盤を公転面から傾けるということについてはうまく再現できなかった。この傾きの不安定性の成長率は小さいため、novalike のような系では働くかもしれないと考えられた。そのため、Patterson は novalike の系を中心に negative superhump の探査を行い、dwarf nova における negative superhump の発見が遅れることとなった。
- Smak (2009b) は、伴星の中心星による照射効果に着目し、円盤の傾斜角方向の不安定性を保持し続ける原因になっているのではないかという見方を提唱した。傾いた円盤は非軸対称な照射効果をもたらすため、これが accretion flow の垂直方向の速度に影響を及ぼし一度傾いた円盤の不安定性を支えるのではないかという仮説を提唱した。従来は、円盤があるために伴星の  $L_1$  点での照射は遮られる、との議論があったがこの仮説は形を変えた irradiation による EMT model の仮説となっている。
- Montgomery and Martin (2010) は、accretion flow のもたらす流体力学的効果によって円盤が持ち上げられることによって円盤の傾きが成長するのではないかという説を提唱した。これは、傾いた円盤では accretion flow が円盤に対して斜めに差し込むためにベルヌーイの法則によって円盤に浮力がかかり、公転面から浮き上がるという考え方である。この見方は negative superhump がみられる系についての  $\dot{M}$  に下限があることを示唆しており、 $\dot{M}$  が大きい系でしばしば negative superhump が報告されているという点にはよく符合する。Montgomery (2012) は SPH 法による数値実験を行い、この仮説に基づく negative superhump が裏付けられたとしているが、追試はなされていない。

## 7.4 SPHシミュレーションによるもの

2000年代に入ってから、いくつかのSPHシミュレーションによって数値計算がなされた。それらによると、公転面から傾いた円盤を仮定すると negative superhump が再現できる (Figure 27)。しかし、再現された negative superhump の振幅は一般的に小さい。しかしながら観測された negative superhump の多くも振幅が非常に小さく、Fourier 解析によって信号として検出されるという形で発見されることがほとんどであるのでこの点については一致する。また、一度 negative superhump が生じた系では accretion flow を一時的に停止してもそのまま円盤の傾きが維持されることもわかっている (Montgomery and Bisikalo, 2010)

## 7.5 superoutburst 中に観測される例

本論文で詳しく述べるように、2011 年 1 月の ER UMa の superoutburst において negative superhump の存在が確認された。この発見以前には、negative superhump が認められる SU UMa 型として ER UMa のほか V1159 Ori、V503 Cyg などが知られていたがこれらの天体で報告された negative superhump はいずれも normal outburst 中あるいは静穏時にみられるもので superoutburst 中に起こるというケースは知られていなかった。ER UMa における発見当初は positive superhump の信号がみられず negative superhump の信号のみが顕著にみられたことから、superoutburst が tidal instability による離心変形の存在によって引き起こされるという従来の考え方の反例となる現象ではないかという点に興味をもたれた。

## 7.6 BK Lyn と激変星進化

BK Lyn は Palomar Green Survey で激変星と思われる天体として発見された (Green et al. (1982), Green et al. (1986))。その後の観測で軌道周期 107.97 分の激変星であることが判明し、その後測光観測が行われた結果 superhump が見られることが判明した (Skillman and Patterson 1993, Ringwald et al. 1996)。ただし、この当時この天体はほとんどアウトバーストによる変動はみられず、ほぼ一定光度を保っていたことから矮新星ではなく新星類似型の天体であると考えられた。これは新星類似型の天体の中では、もっとも短い軌道周期を持つものである。Patterson et al. (2013) は、Enrique de Miguel の観測によってこの天体が新星類似型から矮新星に移行しているところが観測されたと報告した。およそ 40 日で superoutburst を繰り返し、その振る舞いから移行後の分類は ER UMa 型矮新星に属するとされた。Catalina Sky Survey (CRTS) の観測によると、2005 年頃には既にこのような ER UMa 様の変動を示すようになっていたことが報告されている (Kato et al., 2013a)。また Northern Sky Variability Survey (NSVS) の観測によると、2002 年にはまだ新星類似型様の

一定光度を保つ状態にあったことがわかっておりこの間に新星類似から矮新星へと移行したと考えられる。また、この変化はBK Lynにおける $\dot{M}$ が発見当時と2011年の間で低下しつつあることを示す。Kato et al. (2013b), Patterson et al. (2013)が2005年までは明確に矮新星としての変動を示してはいないと指摘しており、その後 $\dot{M}$ が低下し $\dot{M}_{\text{crit}}$ より小さい値になったと解釈することができる。

Kemp et al. (2012), Patterson et al. (2013)はこの現象を、激変星の比較的短いタイムスケールでの変化と関連付けて説明した。矮新星BK Lynの一は、古い中国の文献の記録に残されている西暦101年12月30日に現れた新星の位置にきわめて近い。Hertzog (1986)はこの天体が101年の新星の対応天体であろうとした。つまり、新星爆発後、白色矮星の表面温度がしだいに低下していくうちに伴星の照射効果が小さくなりそれにともない $\dot{M}$ もしだいに低下していく。その結果、 $\dot{M}$ が $\dot{M}_{\text{crit}}$ を下回り、熱的不安定性を引き起こすようになり新星類似型からER UMa型矮新星へと移行したものとみられる。

またPatterson et al. (2013)はこの様な現象がBK Lynで特に見られた理由として、period gapよりも短い周期であったことが関係あるのではないかと述べている。period gapより長い軌道周期を持つ系では、質量比 $q$ が大きい値を持ち、そのため伴星が比較的早期である。このような比較的早期な伴星は磁場の活動が活発であるため磁気ブレーキによる軌道周期の減少が重力波放出による軌道周期の減少に比べてはるかに大きく、 $\dot{M}$ が常に大きくなることが予想される。そのため、このような系では古い新星でも新星類似型の状態にあるのであろうと予想する。

しかし、period gapより短い軌道周期の新星の場合、状況は大きく異なる。このような系は伴星が完全に中心まで対流状態になっているために磁気ブレーキがほとんど働かず、主に重力波放出で質量輸送が引き起こされている。また、さらに白色矮星表面が冷却されればRoche lobeを満たさなくなる可能性も考えられる。つまり、BK Lynにこのような新星類似型からER UMa型矮新星へと移行するフェイズが存在しているということはこの系がperiod gapより短い軌道周期を持つことと強く関係している可能性が示唆される。このように、新星と矮新星はまったく無関係のものではなく、一つの天体が両方の状態を示すことがある可能性もある。

Kato et al. (2013a)は、このような数千年のタイムスケールだけを原因と考えるには3年以内で新星類似からER UMa型矮新星への移行というのは時間的に短すぎるため、このような進化の影響だけでなく質量輸送率の変化も関係あるのではないかと論じた。

## 8 近年のWZ Sge型矮新星の理解についての進展

ここまででも何度か言及されてきたWZ Sge型矮新星は、かつては大きな増光振幅とまれな増光頻度、及びsuperoutburstのみしか見られないなどといった特徴から

なる天体として知られていたが、明確な定義はされていなかった。Osaki (1995) はこのグループの天体が、SU UMa 型矮新星が次第に進化して質量移動率が低下した段階にある天体ではないかという見方をした。このような円盤では円盤の粘性  $\alpha$  が非常に低くなるため、大きな superoutburst と長い増光間隔が実現されるのであるという仮説を示した。一方、Patterson et al. (1981) は質量輸送率が急に上昇することによって WZ Sge 型のような大きな superoutburst が引き起こされるという見方を示した。また、WZ Sge 型の矮新星の増光初期に観測される軌道周期に一致する周期の変動(現在では early superhump として知られているもの)が見られることから、これが enhance された質量輸送によって振幅の大きくなった orbital hump であるという解釈をとっていた。

WZ Sge 型矮新星の正体を明らかにするために、WZ Sge 型矮新星の superoutburst を最初期の立ち上がりの部分から観測する必要があった。しかし、90 年代後半に至るまで、このような時期が観測されている WZ Sge 型矮新星はなく、いずれも増光開始からかなり時間が経った状態で発見されていたため、この部分の振る舞いは明らかにされていなかった。WZ Sge の 2001 年 superoutburst と AL Com の 2001 年の superoutburst Ishioka et al. (2002) は、このような状況下で研究が進む大きな手がかりとなった。これらの WZ Sge 型矮新星の superoutburst はいずれも増光途中で発見されたため、どのように early superhump が現れてくるか、及び early superhump のプロファイルについて明確な観測ができたためである。これらの天体の early superhump の観測から、early superhump は増光とともに発達すること及び double-peak のプロファイルであることが明かになった。これらの観測事実は、early superhump が Patterson et al. (1981) が提唱するような orbital hump であるという見かたに一致しない。一方で、Osaki and Meyer (2002) は early superhump を説明する理論として 2:1 共鳴による不安定性を唱えた。これは、通常の SU UMa 型矮新星では 3:1 共鳴半径まで円盤が広がることによって生じる円盤の不安定性によって円盤の変形が引き起こされるのに対して、さらに質量比が特に低い系の場合、円盤が公転周期の 2:1 共鳴半径まで広がることによって生じる円盤の不安定性である。3:1 共鳴による不安定性が離心円状になるのに対し、2:1 共鳴による不安定性は 2 本腕状に円盤の盛り上がりが生じさせる。そのため、3:1 共鳴半径で引き起こされる不安定性の場合とは異なり円盤に歳差を引き起こさせる作用は持たず、その代わりに公転に伴い盛り上がった部分によって隠される円盤の面積が変化し、軌道周期に一致した変光を示す。Baba et al. (2002) は WZ Sge の early superhump が見られる時期に得られた分光観測のデータを用いて Doppler tomography による円盤の再構成を行い、Osaki and Meyer (2002) で予想されているような二本腕構造が存在することを見出した。

また、WZ Sge 型矮新星には減光後の再増光が見られるものがある。EG Cnc(Patterson et al., 1998; Matsumoto et al., 1998) では 1996 年の superoutburst で減光後に 6 回の再増光が報告され、AL Com(Patterson et al., 1996) では回数は 1 回だが非常に長く続く再増光が観測された。Osaki et al. (1997) はこのような再増光のメカニズムを説



明するために、円盤の温度が下がった減光後に円盤の粘性が何らかの理由によって増加したためにこのような現象が起きたのではないかという仮説を提唱した。一方で、Hameury et al. (2000) は減光後に白色矮星の照射によって伴星からの質量輸送率が増大し、それによって再増光が生じるというモデルを唱えた。1.3.2 章でも触れたとおり、WZ Sge 型矮新星の再増光のスタイルは 1 度の長い再増光を示す系・複数の短い再増光を示す系・1 度の短い再増光を示す系、および加えて、再増光自体を示さない系も存在する。これらのうち、WZ Sge 型矮新星に特徴的な系は複数の短い再増光を示す系と 1 度の長い再増光を示す系である。Kato et al. (2009, 2010) はこれらの再増光の様子の違いが、連星の質量比および軌道周期との関係があることを示唆した。つまり、複数の再増光を示す系では質量比が小さく、1 回の長い再増光を示す系および再増光を示さない系については、軌道周期が短いという傾向がある。また、複数の再増光を示す系は総じて増光間隔が長いこととも合わせて、複数の再増光を示す系が period bouncer の候補である可能性を示唆した。

しかし、この論文が執筆された時点では、 $\dot{P}_{dot}$  が  $\epsilon$  との相関があることを利用して  $\dot{P}_{SH}$  を  $\epsilon$  の代わりとし、 $\epsilon$  を質量比  $q$  と結びつけて議論がなされていた。しかし、その後の研究の発展で、 $q$  と  $\epsilon$  の正確な関係を求めるためにはそのようなやり方は的確ではなく、stage A の superhump 周期から求めた  $\epsilon^*$  を用いるべきであることが明らかになった。この関係を用いて多くの矮新星の  $q$  を見積もった結果、これまで period bouncer の候補として目されてきた WZ Sge 型矮新星の多くは period bouncer ではないことが示された。その後 Nakata et al. (2013) は、2012 年に観測された複数の再増光を示す 2 つの矮新星について、 $\epsilon^*$  を用いた  $q$  の見積りを行った。その結果、複数の再増光を示す系と再増光を示さない系では、はっきりした違いが見られないことがわかった。このことから、再増光を示す系がかならずしも period bouncer ではないことも判明した。

## 9 2013 年以降の Osaki, Kato による論文

### 9.1 Osaki and Kato (2013a)

#### 9.1.1 対立仮説その 1 EMT model

thermal tidal instability の他に superoutburst が起こる理由について提唱されている説が二種類ある。古くから提唱されている enhanced-mass transfer (EMT model) によって引き起こされるとしている説 (Smak, 1991, 2004, 2007) である<sup>3</sup>もともと、enhanced-mass transfer model は SU UMa 型矮新星の superoutburst を説明するためのものとして TTI model 以前に提案されていた考え方で (Vogt, 1983)、なんらか

---

<sup>3</sup>。

の理由によって伴星からの質量輸送が増大することによって superoutburst が引き起こされた、と解釈するものである。一般的には、伴星からの質量輸送の増加の原因としては伴星の照射加熱効果による温度上昇によるものと解釈している。このような解釈の元では、superhump は superoutburst とメカニズムを必ずしも共有している必要はない。Smak (2009a) は superhump は mass transfer の量が増加するために accretion spot の明るさが変化したものを見ているのだと解釈している。また、Smak (1991, 1994, 2000) は TTI model よりも EMT model が superoutburst の描像としてふさわしいとする理由について以下の二点を述べた。

1. Vogt (1983) は VW Hyi の観測で、次の superoutburst が始まる 40 日以内に起きた normal outburst の最中やそこからの減光の最中に orbital hump を観測している。これは、すでに伴星からの mass transfer が増加していたことを裏付けるものである。このような現象は TTI model では説明することができない。
2. TTI model では superoutburst と superhump は密接に関連した現象であるとされており、それらの時系列的な関係は円盤が 3:1 共鳴半径に達することで円盤の形状が離心円盤となり、それにより熱潮汐不安定が生じて accretion rate が増加するという順序になっている。このため、もし TTI model が正しいとしたら superhump は superoutburst のごく早い時期に現れるべきである。しかしながら、実際には多くのケースで superoutburst の極大から 1 – 2 日してから superhump は現れており描像に矛盾がある。

また、EMT model に基づいた光度曲線のシミュレーションは Smak (1991), Schreiber et al. (2004) によってなされており、それらが実際の光度曲線と符合しているかについて論じられている。しかし、これらのモデル計算はいずれも、粘性を半径に依存しないものと仮定すると inside-out outburst になるため、実際の光度曲線と一致していないという問題がある。また短い波長での光度変化では、superoutburst 開始時に precursor 様の変動が再現されたが、これは EMT model でも TTI model でも等しく再現された。このようなことから、Schreiber et al. (2004) はどちらが正しいかははっきりしないが、mass transfer rate の変化はいろいろな supercycle の SU UMa 型の系が存在し、一つの天体の中でも supercycle が変化することがみられるというように実際にそれに対応している変動があることから EMT model のほうがより確からしいのではないかとした<sup>4</sup>

### 9.1.2 対立仮説その 2 Pure Thermal Instability Model

van Paradijs (1983) は superoutburst を通常の outburst のアウトバースト 継続期間の長いものであり、引き起こされている物理的として特に違いはないのでありどち

---

<sup>0</sup>Osaki (1985) がこの説を初めて唱えたが、Osaki (1985) はその後この見方を取り下げた。

<sup>4</sup>。

らも thermal instability のみが機能しているという pure thermal instability model を提唱した。SU UMa 型矮新星でない、より軌道周期の長い矮新星は、短い outburst と長い outburst を示すものがある。これは単純に thermal instability によるもので、TTI model は関知していない。SU UMa 型の superoutburst もこれと同様の現象であるとしているのがこの理論の特徴である。Cannizzo et al. (2010, 2012); Kato et al. (2012a) は近年でも TTI model よりこちらのほうがふさわしい理論であるという提唱を行っている。

Cannizzo et al. (2010) は thermal instability のみで駆動する数値計算を行い、TTI model を採用しなくても superoutburst や supercycle は再現することが可能であるという提案をしている。彼らの考え方では、短い normal outburst は円盤の内側から外側へと thermal instability が広がる inside out 型の outburst が最外縁まで広がらず、途中で instability の decay が開始したものとして説明できる、としている。この場合、円盤の外側の物質は normal outburst が起こっても内側へ運ばれることがなくそのまま残るので、normal outburst がくり返されても降着するのは内側の物質だけである。そして最終的に最外縁まで広がりうる outburst が生じたときに外側には normal outburst の間降着しなかった物質が蓄積されておりこれによって通常より長い outburst が生じる。このような outburst が superoutburst であり、superhump はそれとは別に引き起こされているもので superoutburst の成因とは関係ないものであるとした。

### 9.1.3 V1504 Cyg の Kepler 衛星による観測

Osaki and Kato (2013a) は、Kepler 衛星が観測した範囲の中に含まれている SU UMa 型矮新星、V1504 Cyg の光度曲線を解析することによって TTI model が正しいことを示すことを試みた。この天体は軌道周期が 0.069549 日の SU UMa 型矮新星で Thorstensen and Taylor (1997); Coyne et al. (2012)、superoutburst の最中には平均周期として 0.072 日の positive superhump を示す一方で、736 日の観測期間のうち 200 日あまりの間にわたって周期 0.068 日の negative superhump が見られる時期が存在するという特徴があった。Osaki and Kato (2013a) はこの天体の Kepler データについて、2 次元周期解析を試みた。5 日分のデータを 0.5 日ずつデータの窓を動かしていく 2 次元 Fourier 解析を行った。

Figure 28 はこれによって得られた解析結果である。この Kepler の観測期間には 4 回の supercycle が含まれているが、もっとも重要なことはこの 4 回の supercycle の間で、supercycle の長さはあまり大きな変化がない一方で 1 回の supercycle に含まれる normal outburst の数が最小で 5 回、最大で 10 回と大きく変化しているという点である。また興味深いことに、前にも述べたようにこの系では negative superhump

---

<sup>0</sup>Kepler 衛星のデータでは、むしろ precursor がほとんど形を変えずに生じていることが分かった。

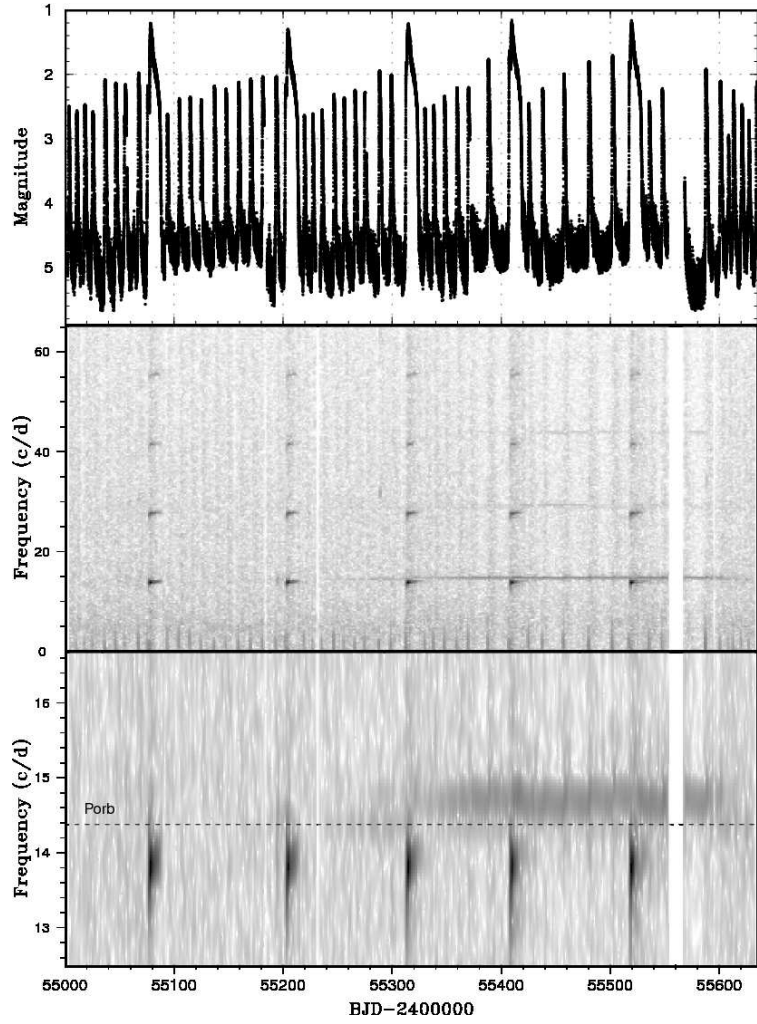


Figure 28: Kepler によって観測された V1504 Cyg の光度曲線およびその区間での二次元周期解析。BJD 2455300 ごろから、図の中に点線で示された、軌道周期に一致する周波数よりやや大きい振動数にピークが現れている。(Osaki and Kato (2013a), Figure 2)

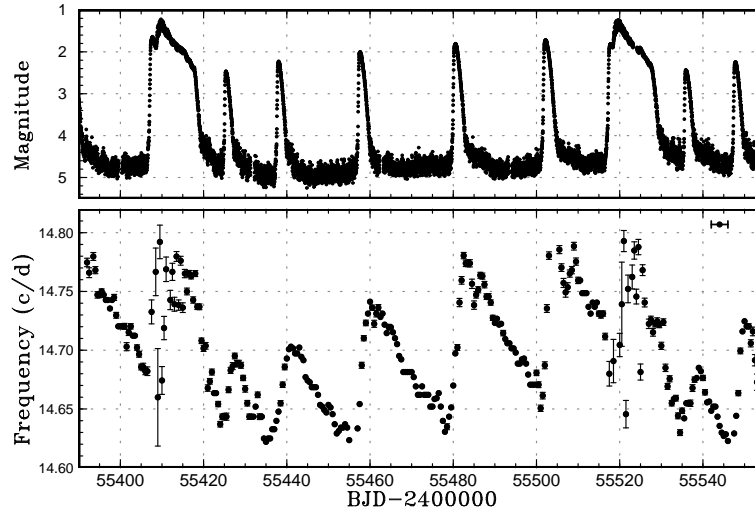


Figure 29: Kepler によって観測された V1504 Cyg の光度曲線を解析して得られた振動数の変化。この周波数は円盤半径を反映していると考えられる。(Osaki and Kato (2013a), Figure 6)

が観測されている期間があるが、ちょうどその期間と normal outburst の頻度が低下している時期が一致していることである。これは、negative superhump の発生が negative superhump によって抑えられるという可能性を示唆している。このような現象は V503 Cyg (Kato et al., 2002) や ER UMa (本論文で記述) で同様にみられている現象である。特に V1504 Cyg では、negative superhump が supercycle の途中でちょうど消失しつつあるというケースでは supercycle の途中で normal outburst の頻度が増加していることが注目される。

Smak (1985) は VW Hyi に 1 つの supercycle あたりの normal outburst の頻度が高い時期と低い時期の 2 種類があることを報告している。normal outburst の頻度が高い時期には normal outburst の間隔は 23 日以下であるが (short の頭文字から S-type supercycle と称されている)、normal outburst の頻度が低い時期には normal outburst の間隔は 30 日に達する (long の頭文字から L-type supercycle と称されている)。これら二つのフェイズの間で、supercycle の長さは 180 日前後であり大きく変化しておらず、1 つの supercycle あたりの頻度のみが変化している。この例にならうと、negative superhump を伴っている時期の supercycle は type S-supercycle であり、伴わない時期の supercycle は type L-supercycle として解釈することができる。Smak (1985) はこの現象に十分な解釈を与えていなかったが、VW Hyi においても V1504 Cyg と同様に negative superhump の消長が生じていた可能性がある。

V1504 Cyg に観測された normal outburst のほとんどは outside-in outburst と思

われる。outside-in outburst か inside-out outburst かは増光速度と減光速度から判断でき、outside-in outburst は小さい増光速度を持ちほぼ左右対称の光度曲線となる。もし negative superhump が生じる理由として円盤の tilt があるとする、円盤の accretion spot は円盤の縁より内側に形成される。そのため、伴星からの降着物質はより内側に蓄積されることになり、outside-in outburst は通常に比べて引き起こされなくなることが期待される。これは type L supercycle をうまく説明することが出来るのではないかとと思われる。

また、Kepler 衛星によって得られた観測は 1 分間隔で継続的に観測が行われているために superoutburst の開始部分についても観測がなされている。それによれば、superoutburst の前に precursor outburst が生じてその極大付近から positive superhump が成長するという superoutburst の発展が顕著に見られた。このような描像は、precursor outburst としての normal outburst によって半径が広がった円盤が 3:1 共鳴半径に届くことで離心円盤の形成が引き起こされ、superoutburst へと発展していくという TTI model の描像によく符合している。

#### 9.1.4 EMT model への反論

Osaki and Kato (2013a) は、Smak による TTI model より EMT model がふさわしいとした二つの根拠については、以下のように反論している。

まず 1 についてであるが、Osaki and Meyer (2003) は既に、Vogt (1983) が観測したものが本当は orbital hump ではなく superhump なのではないかという疑念を示していた。また、EMT model は伴星の反射光かが大きなファクターとなっていることから、superoutburst 中に増加した mass transfer の影響を更に受けるはずだが Schreiber et al. (2004) はそれについて考慮しておらず不完全であるという指摘をした。

さらに、Kato et al. (2012a) は Kepler の V1504 Cyg の観測から、superhump が途中まで成長したものの充分に発展せずそのまま減光した normal outburst が存在したことを示している。VW Hyi で観測された現象は、このような “failed superhump” だったのだろうと解釈することによって説明できるのではないかと示唆している。

また 2 については、V1504 Cyg の観測では superoutburst はつねに precursor を付随して起こり、precursor outburst から superoutburst へと発展していく付近から positive superhump が成長していく。そして、superhump の振幅は superoutburst の極大光度に達する付近でもっとも大きくなる。このことから、Smak の観測的に superhump と superoutburst が起こる順序は正しくなく、むしろ TTI model にそったものであることが示される。

また、precursor を持たず superoutburst の極大に達してから superhump が発展するケースがあることに問題はない。というのは、もし superoutburst が開始した時点で 3:1 共鳴半径に円盤が達している場合は precursor を要することなく潮汐不安定性が引

き起こされる。この場合はその後 superhump が成長するため (Type B superoutburst, Osaki and Meyer (2003)), superoutburst が開始後 superhump が成長するというケースを説明する。このようなケースは V1504 Cyg のような outburst を頻繁に示す天体ではなく 静穏時において粘性に関するパラメータ、 $\alpha$  の小さな mass-transfer rate が低い系で起こると考えられる。

sueproutburst 中に negative superhump と positive superhump が共存している時期があり、negative superhump の振幅は等級スケールだと減少しているが、flux スケールではほぼ一定の値になっている。negative superhump が hot spot における変動を見ているものと解釈すると、これは sueproutburst 中に mass transfer rate が上昇していないということを示すため、EMT model にあまり 合致しない。

### 9.1.5 Pure Thermal Instability Model への反論

もっとも重要な問題は、Cannizzo et al. (2010) がモデルとして提唱したような描像は SU UMa 型矮新星の normal outburst が inside-out outburst でなければ成立しないということである。実際の V1504 Cyg で得られた光度曲線はいずれも outside-in である。Cannizzo et al. (2010) は V1504 Cyg と同様に Kepler 衛星で詳細な光度曲線が得られているもう一つの SU UMa 型矮新星、V344 Lyr について数値実験によって再現された光度曲線と実際の光度曲線をくみ合わせて thermal instability のみで説明が可能であるとしている。特に、V344 Lyr でも同様に見られる precursor outburst 様の「肩」のような形状の光度変化を再現することが可能であるとしているが、彼らの数値実験で再現された「肩」様の光度曲線はあまりに期間が長すぎる様に思われる。しかし、それ以上に問題なのは、彼らが再現しているこのような光度曲線は、inside-out outburst が途中で広がるのを中断し、その後また外側に広がり始めるという形で再現しているということである。この途中で cooling wave が生じた場合は、途中でアウトバーストが終了してしまうことになるので、最外縁まで thermal instability が広がって初めて superoutburst になるということになる。しかし、多波長で観測されたケースをみると、紫外線では precursor outburst と本来の superoutburst の間の減光はより深くなって別の normal outburst であるかのように観測される (Pringle et al. 1987, Mauche and Raymond 2000)。これは precursor と superoutburst の間で一度 cooling wave が生じて温度が一時的に低下していることを示唆しており、一時的に heating wave がディスクの途中でとどまっているという見かたには適合しない。

### 9.1.6 negative superhump の周期発展

観測された negative superhump には系統的な周期変動がみられることから、Osaki and Kato (2013a) はより 詳細な周期変動を調べるために、二次元周期解析と同様の手法で (解析範囲は 4 日に変更) Fourier 解析の代わりに Phase Dispersion Minimization

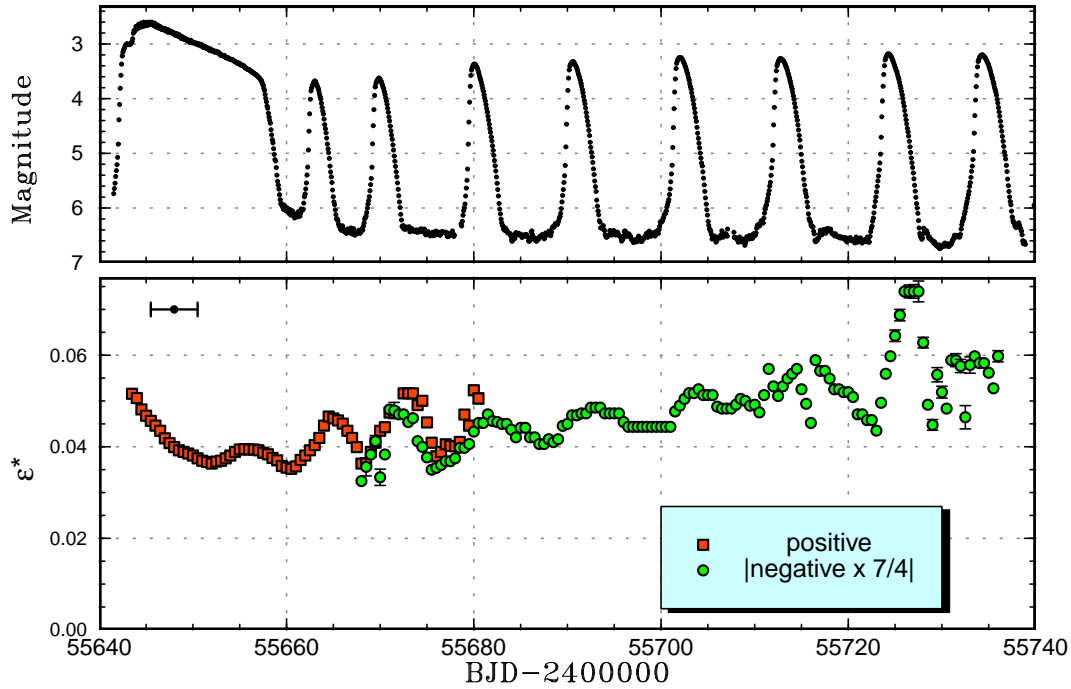


Figure 30: Kepler によって観測された V344 Lyr の positive superhump と negative superhump 両方を解析して得られた  $\epsilon^*$  の変化。これは、円盤半径の変化に対応する。(Osaki and Kato (2013a), Figure 13)。

(PDM) 解析 (Stellingwerf, 1978) を採用して解析を行った。PDM とは、観測点をある周期で folding したときの分散がもっとも小さい周期をもっとも確からしい周期として得る手法で、Fourier 解析に比べて観測の大きなブランクがあるデータで周期を精度良く求めることができる。その結果 supercycle の期間中に negative superhump の振動数が normal outburst 時に増加し、次の normal outburst が始まるまで減少するというサイクルを繰り返して全体としては増加していくという傾向が見られた (図 29)。negative superhump が円盤の傾きによって引き起こされているという仮定をした場合、半径の変化をとらえたものと見ることができる。この negative superhump 周期の変化を半径の変化として解釈した場合、supercycle を TTI model で解釈したものとよく合う。特に、superoutburst が引き起こされた時の半径が 3:1 共鳴半径付近に達していることが注目される。



## 9.2 Osaki and Kato (2013b)

Osaki and Kato (2013b) は Kepler 衛星の観測範囲に含まれる二つの矮新星、V344 Lyr と V1504 Cyg のデータについての解析を行った。周期解析に Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (Lasso) を取り入れ、V1504 Cyg についてはより精度よく negative superhump の周期変化が得られた。

Osaki and Kato (2013a) を受けて、EMT model の提唱者である Smak が反論論文を発表した (Smak, 2013)。反論の趣旨は以下のようなものである。

negative superhump の周波数は outburst の 3 日前後前にもっとも小さくなり、そこから 3 日ほどかけてもっとも大きくなる。これは円盤の半径が outburst の 3 日ほど前に増大しはじめ 3 日ほどかけてもっとも大きくなることを示しているが、outburst に関する理論では増光とともに半径が増大し最大になるのに 0.5 日程度しかかからないとしており矛盾する、というものである。

これについて、astro-ph に最初に報告されたバージョンでは日付のプロットが 2 日ずれていたため、一つにはその問題であり改訂版で修正されたとしている。しかしそれでも 1 日のずれがある。これは、ここで行っている周期解析は 4 日間分のデータを取り、そのデータ範囲を 0.5 日ずつずらしていくという形で時間発展を追っている際に段階的に outburst 状態のデータが入ってくるという形になっているため、実際の周期変化にかかる期間を必ずしも反映していないことを示した。そのため、周期解析に用いるデータの窓の広さを 4 日にすると、半径の変化にかかる長さは半分になる。これらの結果は、窓の範囲を移動させる 0.5 日より短いタイムスケールで円盤の半径が変化したということを示すものであり、むしろ TTI 理論に符合した半径変化を示しているということがいえる。

また、同様にこのことは  $O-C$  カーブからも示される。negative superhump のピークについて  $O-C$  カーブを作成すると、増光に当たる部分で尖った形状の折れ曲がりが見られて急速な周期変化をここで示していることがわかる。この折れ曲がりにかかる長さは 1 日以下で、おそらくは 0.5 日より短いことからやはり outburst に伴う半径の変化は TTI model から予想されるタイムスケールで起きていることがここからも裏付けられる。

また、negative superhump の振幅の変動を flux 単位でおこなったところ、各 outburst 時に振幅の上昇が起きていることが確認された。このことについて、Osaki and Kato (2013a) は negative superhump は必ずしも accretion spot だけではなく disk の一部も光源になっているためではないかという説を唱えた。さらに、superoutburst 中に見られる negative superhump のプロファイルが静穏時にみられるときのプロファイルに比べてより対称的なものに変化していることと、normal outburst 中のプロファイルはその中間的な形状になっていることからそのような傾向が見えるのではないかという可能性が疑われる。

Smak (2013) は negative superhump の振幅の superoutburst 中と静穏時の違いが

円盤の半径の変化と整合していないのではないかという批判を行っている。これは、superoutburst 中は円盤の半径が増大しているために negative superhump はより外側で形成されるようになり、振幅が小さくなるはずだという考え方に基づく。しかし、superoutburst 中の negative superhump の光源は前述のように accretion spot 以外にも由来しているからだろうと述べている。

また、superoutburst 中に positive superhump と negative superhump が共存して観測されている。V344 Lyr の positive superhump について、Wood et al. (2011) は初期からアウトバーストの中期については従来通り円盤の歳差運動による粘性散逸の変化で解釈することができるが、後半の時期については離心円の縁に作られる accretion spot で生じるエネルギー発散の大きさが公転に伴って変化するために生じる “late superhump” などではないかという見方を提唱した。これは、cooling wave が外側から始まると考えると、外縁部に光源を持つ positive superhump は減光期以後は円盤によるものというより accretion flow によるものと考えた方がよいのである。このような positive superhump は V344 Lyr の場合、superoutburst のあと 2 回の normal outburst の期間にわたって継続している。

superhump が円盤の外縁部に局在してるか、それ以外の円盤の温度が十分に高くない状態にあるとき、円盤における pressure effect は無視することができる。この時、式 (39) で示されている式のうち第 2 項にあたる部分がかからず、力学的な項である第 1 項のみが円盤の歳差を決定づける項になる。このような場合、positive superhump と negative superhump がいずれも見られるとき、その周期に対する  $\epsilon^*$  の絶対値について

$$\frac{\epsilon_+^*}{|\epsilon_-^*|} = \frac{7}{4} \quad (47)$$

の関係がある。このことから、positive superhump に対する  $\epsilon_+^*$  と、negative superhump に対する  $|\epsilon_-^*|$  に 7/4 の補正をかけたものの比較をすることによってこれらのメカニズムについて考察し、両者の変動がよく一致していることからこれらの変動の原因が離心円盤と円盤の公転面からの傾きであることを裏付けているとしている。しかし、superoutburst の開始後 eccentric wave が内側へと広がるにつれて、pressure effect が発生すると円盤の歳差速度はこれに比べて減少する。

### 9.3 Osaki and Kato (2014)

Osaki and Kato (2014) は V344 Lyr と V1504 Cyg の Kepler データを用いて precursor などの性質についてより詳しく調べ、新たにいくつかの TTI model と superoutburst の振る舞いが合致する現象を報告した。まず第一に、今までのように「肩」のような precursor がない superoutburst が V344 Lyr、V1504 Cyg の両方に存在していることを報告した。これらの superoutburst は precursor outburst が付随して

いないためこれまで報告されてきたような superoutburst とは異なるように見えるが、このような superoutburst の直前の時期のデータについて 2 次元 Fourier 解析を行い周期解析を試みた結果、superoutburst の一つ前の normal outburst の途中から positive superhump に相当する信号が現れ始めていることが分かった。この一つ前の normal outburst と superoutburst の間は約 5 日間離れており、superoutburst が開始する時点ではほぼ静穏状態まで戻っているために二つの outburst に見えるが、実際には precursor outburst であると考えられる。これは、positive superhump が superoutburst を引き起こしているという TTI model をより強く裏付ける結果となっていると言える。

また、V1504 Cyg、V344 Lyr の両方で superoutburst が引き起こされる normal outburst の一つ前の normal outburst で、positive superhump が一時的に発生するものの途絶えてしまうという failed superhump が観測されることを見出した。これは上で述べたような静穏時の状態にほぼ戻ってから positive superhump が成長するようなケースと異なり、静穏時の状態まで戻りそのまま positive superhump が superoutburst が引き起こされることなく decay してしまったケースと考えられる。また、このような現象は Kato et al. (2010) でも、V1504 Cyg について既に述べられている。このような failed outburst の存在は、Osaki and Meyer (2003) でその存在が TTI model に基づいて予言されている。

また、この論文では今後理論的な解明が望まれる現象として、mini-outburst の存在があげられている。この mini-outburst は V1504 Cyg の、negative superhump がみられない type S-supercycle の間に限ってみられたものである。TTI model では円盤の半径が次第に上昇するにつれて thermal instability が引き起こすのに要求される面密度  $\Sigma_{\text{crit}}$  が大きくなるために一般的に次の superoutburst が近づくにつれて normal outburst の起こる間隔は長くなるのが通例である。しかし、V1504 Cyg の type-S supercycle の中にはこの間隔が途中で再度短くなるケースがあることが既に報告されている (Cannizzo et al., 2012)。Cannizzo et al. (2012) はこれを TTI model と符合しないケースとしてあげている。このような outburst を説明するために、面密度と質量降着率の安定解が通常の場合の 2 つの解に加えて中間的な解が存在し、大きなリミットサイクルと小さいリミットサイクルの二種類が生じているのではないかという仮説を唱えている (Figure 31)。

また、Osaki and Kato (2013b) に引き続き、Osaki and Kato (2013b) に対する反論論文である Smak (2013) に対する再批判を行っている。前回の論文でも触れられた、outburst 中には円盤の半径が増大するために negative superhump の振幅は増大するはずだという Smak の批判に対して、円盤の半径が大きい方が negative superhump の振幅は大きくなるはずで Smak の考えとは逆であることを指摘している。

また、Smak (2013) は食のある矮新星 Z Cha の outburst 中の食の長さを測定することにより半径を見積もっており、半径の減少はみられないとしている。食の長さからの半径の見積りは、superhump 周期から半径を見積もる方法と並んで円盤の半

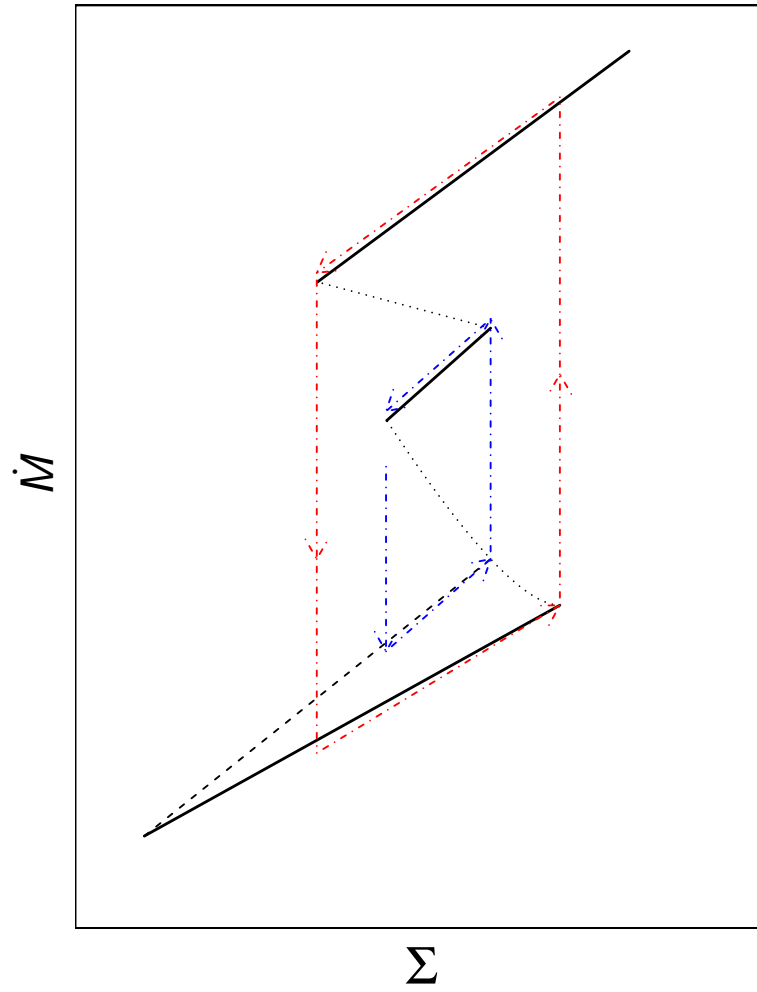


Figure 31: 二重の limit cycle が存在するという見方。(Osaki and Kato (2014), Figure13)

径の変化を知る上では重要な手法である。しかし、Osaki and Kato (2014) は Smak (2013) が半径の変化を調べた期間が superoutburst の後半しかカバーしておらず、全期間に渡っていないこと、および誤差が大きすぎるために統計的に有意でないことを指摘した。その上で、食のある別の矮新星である IY UMa の 2009 年の outburst 中の観測データについてマルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC) を用いて superoutburst を通じての円盤の半径の変化を見積もり、superoutburst が進行するにつれて半径がむしろ減少することを示した。

Smak (2013) は、BK Lyn や ER UMa といった系は negative superhump が顕著に見られるが、これらの系では V1504 Cyg と違いあまり顕著に supercycle を通じての negative superhump の変化が見られないという点を指摘して Osaki and Kato (2014) に反論している。しかし、Osaki and Kato (2014) によればこれら二つの天体は V1504 Cyg に比べると短い間隔で normal outburst を示すため、静穏状態にある期間が非常に短い。そのため、normal outburst の開始に伴う半径の増加後の円盤半径の減少が V1504 Cyg に比べてはつきりしないことが関係していると Osaki and Kato (2014) は述べている。

EMT model が正しい裏付けとして、Smak (2013) は superoutburst 中に hot spot の明るさが増したという事例 (Smak, 2008) を引いている。しかし、この事例は superoutburst 中の光源を軸対称の円盤と hot spot であるという仮定のもとでそのような結論が得られているものであるため、離心円盤を持つ superoutburst 中の円盤では適用できないのではないかと述べている。

## 9.4 Kato and Osaki (2013b)

Osaki and Kato (2013a) は V1504 Cyg の膨大なデータを解析することにより stage A が潮汐不安定が 3:1 共鳴半径に偏在している時期に相当すると解釈し、これが円盤のより内側へと広がっていき始めた段階が stage B に当たるのではないかとこの考え方を示した。Kato and Osaki (2013b) で、この Osaki and Kato (2013a) を元にした考え方では、superhump が 3:1 共鳴半径で偏在している時期は superhump は力学的な効果のみで引き起こされているため、pressure effect の存在を考えず、純粋に  $q$  のみの関数として  $\epsilon$  を考えることができるという考え方を提案した。また、従来は軌道周期  $P_{\text{orb}}$  に対して superhump 周期  $P_{\text{SH}}$  が何%長いという値を  $\epsilon$  として採用していたが、precession rate に直接関係するのは周期ではなく振動数なので、 $\omega_{\text{orb}}$  の  $\omega_{\text{SH}}$  に対して何%長いという値を採用するべきであるとした。そのため、従来の  $\epsilon$  の代わりに、 $\epsilon^* = P_{\text{SH}} - P_{\text{orb}}/P_{\text{SH}}$  を用いるべきだと提案した。

前の章で論じたように、従来の考え方では WZ Sge 型のうち複数の再増光を示す天体を中心に period bouncer が多く発見されていると考えられてきた。しかし、従来のように mean superhump period を用いた場合、stage B, C の superhump 周期はいずれも stage A superhump の周期より短いことから、stage A の superhump 周期

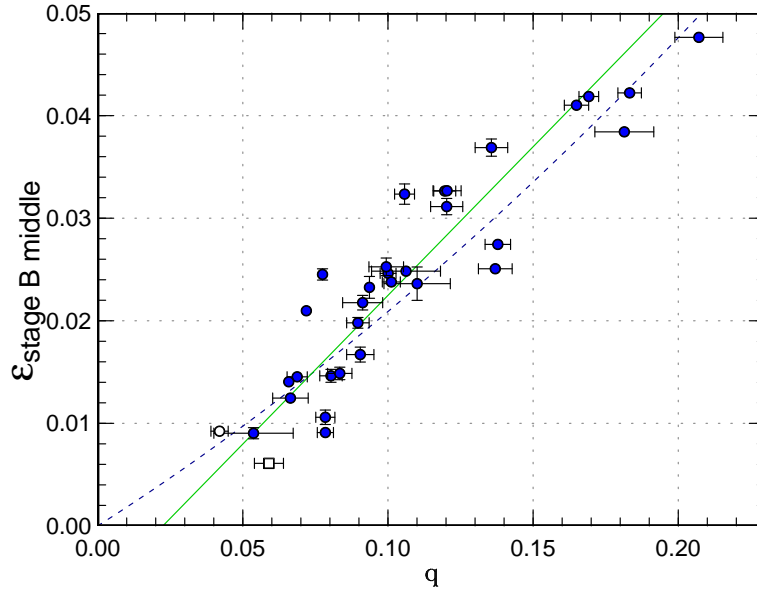


Figure 32: Patterson et al. (2005) で見積もられた  $\epsilon$  と、Kato and Osaki (2013b) で見積もられた stage A superhump の  $\epsilon^*$  の関係。特に小さい  $\epsilon$  の範囲で違いが大きくなる。(Kato and Osaki (2013b), Figure 7)

より小さい  $\epsilon$  が求められる。この影響により、従来の方法では特に  $\epsilon$  の小さい系に対して  $\epsilon$  に対する  $q$  の値が系統的に小さい値をとるようになる (Figure 32)。このため、 $P_{\text{orb}}$  と  $q$  の関係を描いた進化トラック実際よりも短いところに period minimum をとるように推定された。この進化トラックから、本来は period minimum 付近に存在すると解釈されるべきである矮新星がいずれも period minimum を経てその位置に達した系として認識されることになり、その結果実際よりも多くの矮新星が period bouncer と判定されることになった (Figure 33)。Kato and Osaki (2013b) は当時発見されていた矮新星のうち真実の period bouncer と解釈しうるのは early superhump が superoutburst 中の間を通じて観測されて positive superhump が再増光のときのみを観測されたという非常に特異な矮新星 OT J184228.1+483742 のみであり、それ以外の period bouncer とされていた天体はいずれも period bouncer ではなく period minimum 付近に位置する系であるとした。

## 9.5 その後の Pdot survey paper について

Kato et al. (2012a) は、Kepler 衛星によって観測された 2 つの矮新星、V344 Lyr と V1504 Cyg についての詳しい解析を行った。これらの解析により、negative super-

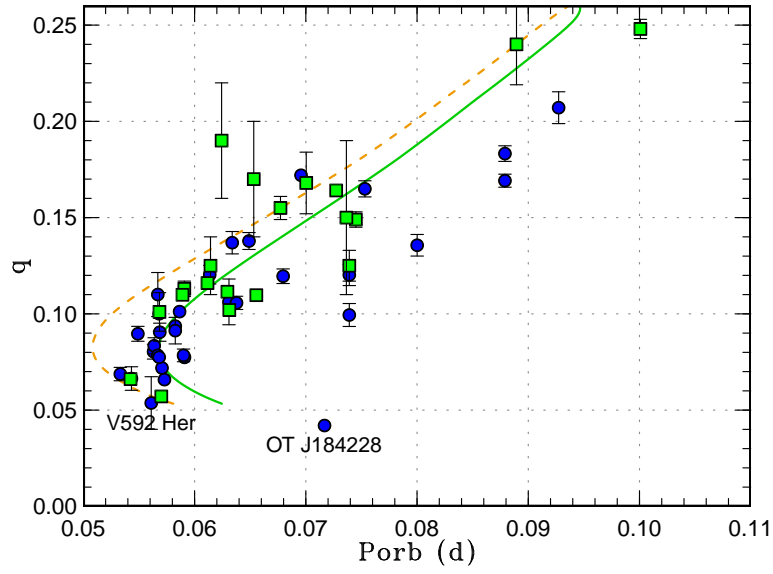


Figure 33:  $P_{\text{orb}}$  と  $q$  の関係。点線は Knigge et al. (2011) で理論的に見積もられた進化のトラックを示し、実線は実際の天体の分布に合うように見積もられた進化のトラック。stage A の superhump 周期から見積もられた  $q$  は進化トラックをよく反映している。(Kato and Osaki (2013b), Figure 5)

humpをはじめとする従来はあまりよく知られていなかった現象について明らかにされるきっかけとなった。

Kato et al. (2013a) では、ER UMa 型矮新星でみられるような新たな知見についても明らかにされてこととなった。このようなタイプの天体は 90 年代の終わりから発見され始めたが、増光間隔が短いために、あまり光度曲線の詳しい様子が明らかになっていなかった。しかし近年詳しい観測がなされるようになって、ER UMa 型矮新星の ER UMa と BK Lyn で negative superhump が顕著に見られることが明らかとされた。一方で V1159 Ori は Kato et al. (2013a) で観測がなされた範囲では positive superhump のみが見られており、今後の増光パターンの変化をめぐって継続した観測が求められることを示唆した。その他の天体では、まだ superhump 周期の発展や軌道周期についても明らかではなくさらなる観測が求められる。

また、伴星として通常の赤色矮星ではなく、ヘリウム白色矮星を持つ系である AM CVn 型にも矮新星が存在する。Kato et al. (2013a) ではこのような矮新星のうちで、増光のふるまいが ER UMa に似ていることで知られているうしかい座 CR について、他の通常の矮新星と同様に stage B-C transition が存在することを示した。また、このような stage B-C transition はブラックホールを主星として持つ系でも見られることから、stage B と stage C の区別は小さい質量比を持つ系に普遍的に見られるものである可能性が高いと考えられる。また、おそらく通常の矮新星とヘリウム矮新星の中間的な段階にあると思われる SBS1108+574 について、superoutburst の長さが通常の矮新星に比べてはるかに長く続くことが判明し、ヘリウムの多い伴星を持つ系にも広い多様性がある可能性が明らかになった。また、CC Scl や MASTER OT J072948、OT J173516 といった天体の superoutburst 時に、複数の周期性がみられることが示唆された。これらのうち、特に後者二つは negative superhump の共存を示唆している可能性がある。

Kato et al. (2013b) では、BK Lyn の長年の観測から、この天体に negative superhump が ER UMa 状の高頻度のアウトバーストを繰り返す時期とほぼ一定光度を保つ時期を繰り返すことが明らかになった。これは、BK Lyn の質量輸送率が  $\dot{P}_{\text{crit}}$  に極めて近く、そのために質量輸送率がそれほど大きく変化しなくてもこの二つの状態を行き来しているためであると考えられる。また、Kato et al. (2013b) ではこの他にもスーパーアウトバースト時の減光速度についても新たな知見が得られている。Osaki (1989) は減光のタイムスケールについて円盤半径と粘性の関数として見積もることが出来ることを示した。このうち、円盤半径は増光中の SU UMa 型矮新星については伴星の質量と系の公転周期から決まることから、粘性と公転周期、および伴星の質量の関数として表された。

Cannizzo et al. (2010) は Kepler 衛星のデータを解析することによって V344 Lyr と V1504 Cyg についての減光速度について見積り、従来よりも軌道周期に強い依存を持つことを示唆した。このような減光速度の違いについて、Cannizzo et al. (2010) はこれが静穏時の円盤の粘性と関係があるのではないかという可能性を示唆した。



Kato et al. (2013b) は、これまで矮新星サーベイで得られた観測を元にして、軌道周期の 0.38(13) 乗に比例することが明かにし、これは従来の 1/4 乗に比例するという見かたに誤差項の範囲で合致していることを示した。一方で Cannizzo et al. (2010) はこのような結果からずれた結果を出しているが、これはむしろ質量移動率が高い系であることが関係しているのではないかという見方を示した。またこの値は WZ Sge 型の矮新星でもほぼ同じ傾向が見られることが明らかになった。しかし、軌道周期から予想されるよりやや小さい減光速度を示す傾向があり、円盤が 2:1 共鳴半径まで広がっているために角運動が通常のケースよりやや落ちるのが遅いためだろうと考えられている。

## 10 動機: tilt した円盤を持つ系から円盤の物理を知る

ここまでの章で見てきたように、激変星に対する見方や得られる情報の量はここ数年の間に大きく変わりつつある状況である。特にこれまではあまり精度のよい結果が得られることがあまりなかったために経験的な見積りにとどまることの多かった、質量比を始めとする天体の物理的なパラメータやその変動について考察することが可能になった。

このような状況下で、激変星のみならず天体一般において着目される現象として disk tilt がある。disk tilt は矮新星だけでなく、降着円盤を持つさまざまな天体で観測されている。例えば、X 線連星では早い時期からその存在が確認されているし (e.g. Katz 1973)、活動銀河核の中心に形成される円盤 (Quillen, 2001)、原始星が形成される過程で生じる円盤 (Papaloizou and Terquem, 1995) などでもその存在が確認されている。特にブラックホールを含む X 線連星系では、中心天体付近からジェットの噴射がみられる天体では円盤が公転面から傾いて存在することによって生じる歳差運動によって、ジェットの噴射方向が変化する様子が観測されてきたことなどからしばしば注目されてきた。

このような円盤の傾きがどのようにして発生するか、という問題については、円盤を形成しているさまざまな種類の天体についてそれぞれの特徴と結びつけられて考えられてきた。例えば X 線連星系については円盤が強いエネルギーの輻射をすることから、輻射場によって円盤が軌道面から傾くという見方がなされている (Pringle, 1996)。また、活動銀河核の場合中心のブラックホールからの wind が生じているため、これによって円盤の傾きが生じているのではないかとされる。激変星の場合、中間ポーラーのように磁場を持っている系の場合、磁場の軸が円盤を形成している軸と一致していないために円盤の公転面からのずれが引き起こされるのではないかという説もある (Barrett et al., 1988)。しかし、これらの天体における tilt の描像は、例えば活動銀河核においては wind の存在、X 線連星系においては強い輻射場や相対論的效果、などとそれぞれの天体の特性に特化してさまざまな原因を用いて説明さ

れている。しかし、いずれも円盤が存在する系という共通点を考えれば、さまざまな種類の tilt を示す天体で円盤に普遍的なメカニズムがある可能性がある。

これらの円盤の傾きを誘発すると考えられているメカニズムのうち、不安定性が成長すると考えられているのは 3:1 resonance によって誘発される円盤の離心変形とともに円盤の傾斜も引き起こされるのではないかという描像 (Lubow, 1992b)、伴星が円盤から受ける反射効果による降着物質の量の変化 (Smak, 2009b)、及び流体を知る力学的な浮き上がり (Montgomery and Martin, 2010) といった見方である。この中で 3 番目の考え方は、negative superhump が観測される天体が一般的に大きな  $\dot{M}$  を持っていることとも一致しており、観測的な事実ともよく合致していると思われる。

このような円盤の tilt の存在について激変星のうえで知ることは、普遍的に存在している tilt について知る上で重要な問題となる。というのも、矮新星、特に強い磁場などが報告されていない矮新星は先ほど述べたような天体と異なり、相対論効果や wind など円盤の構造以外の tilt を引き起こす可能性がなく、純粹に円盤における物理のみを考えて矮新星上における降着円盤の物理的な描像を知ることができるという点で重要である。そのため、矮新星における tilt の存在について知ることができれば、円盤における tilt の普遍的に引き起こすメカニズムについて知る上での大きな手がかりとなる。

矮新星上の tilt の存在を示唆するもっとも重要な現象が、negative superhump である。negative superhump が存在するような系で tilt が確かに起きていることを確認することができれば、円盤の物理について知る上で大きな足がかりとなる。本論文では、このような tilt した円盤が存在する系の観測を長期的に行うことで、このような円盤の存在は矮新星の変動にどのような影響を及ぼすのか、および negative superhump の周期を追うことで矮新星における円盤の変化を追うことによって矮新星の円盤上における物理を追うことを目的とするものである。

なお、当研究における役割分担について、京大屋上観測所での観測については著者が行い、測光は加藤氏が行った。それ以外の観測地点の観測とデータ処理は、個々の観測者が行った。Variable Star Network (VSNET, Kato et al. 2004) を通じた共同観測者への呼びかけと結果のフィードバックは著者が主に行った。集まった観測データの処理は著者と加藤氏が行った。

統計解析に用いた PDM や Lasso は、加藤氏の開発したソフトを用いた。光度曲線に関する数値実験についてのソフトの作成は著者が行った。光度曲線から negative superhump を分離するソフトの作成は、加藤氏のソフトを元に著者が改訂したものを用いた。

# Chapter 3

## ER UMaにおける negative superhumpの発見と観測

### 11 ER UMa発見の歴史

ER UMa は、1985 年に Palomar Green Survey によって紫外線過剰天体として発見された天体である (Green et al., 1986)。Zwitter and Munari (1994) によって分光的にみて激変星に分類されることが判明し、その後行われた測光観測によりこの天体は矮新星に属する天体であろうということが判明したが、Iida (1994) はこの天体には 0.7 等/日の減光スピードを持つ SU UMa 型矮新星の normal outburst のようなアウトバーストに加えて、Z Cam 型矮新星でみられるような standstill のように見える現象も存在するということを報告した。

その後、Kato and Kunjaya (1995) は、ER UMa が supercycle 43 日の SU UMa 型矮新星であることを明かにした。また、この天体のスーパーアウトバーストは supercycle のうちの非常に大きな割合をしめ、20 日程度継続することも示した。Kato and Kunjaya (1995) は superoutburst 時に superhump を観測し、その周期を 0.06573(5) 日と見積もった。また同時期に ER UMa に似て、非常に短い supercycle を持つ類似の天体、V1159 Ori が発見されたため (Nogami et al., 1995)、矮新星の新たなサブグループとしてこの二つからなる ER UMa 型が提案されることとなった。その後、Thorstensen et al. (1997) は ER UMa を分光的に観測し、視線速度の周期変化から軌道周期 0.06366(3) 日を得た。

いくつかの特殊な現象がみられるけれども (Kato et al. 1996; Kato et al. 2003)、positive superhump が superoutburst 中に観測されたという点で ER UMa は他の SU UMa 型矮新星とよく似ている (Kato et al., 2003)。Gao et al. (1999) と Kjurkchieva and Marchev (2010) が静穏時や normal outburst 中の negative superhump の存在を報告した。このような現象は静穏時や normal outburst 時に限られ、superoutburst

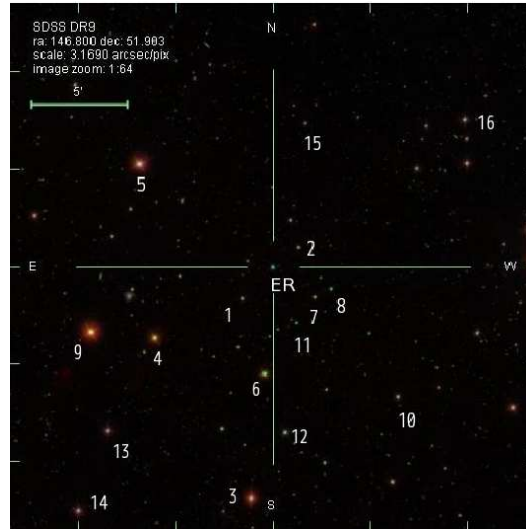


Figure 34: ER UMa とその周囲のファインディングチャート (<http://cas.sdss.org/dr7/en/tools/chart/chart.asp> より取った。)

時には報告されていなかった。

## 12 2011–2012 年の superoutburst

2011 年 1 月 16 日に G. Poyner 氏によって ER UMa が superoutburst が報告された (vsnet-alert 12671)。この報告を受けて、Enrique de Miguel によって連続測光観測が行われた。この際に得られた観測について PDM 周期解析を行ったところ、positive superhump の周期と考えられうる軌道周期より長い周期での変動がはっきり認められず、その一方で軌道周期より短い 0.0616 日の周期が認められた (vsnet-alert 12682)。こののちに岡山理科大学の望遠鏡を用いて観測を行った赤澤秀彦氏によっても同様の結果が得られた。このことを受け、superoutburst 中にも関わらず negative superhump を示す異様な系として VSNET Collaboration (Kato et al., 2004) によって、ER UMa の体系的な観測キャンペーンが行われることになった。

2011、2012 両年を通じて、計 411 夜の観測が行われた。これらの観測はいずれも望遠鏡にとりつけられた CCD による測光観測である。観測者と観測装置のログは Table 1 にまとめられている。これらの観測データの詳細なログについては、Appendix にまとめられている (Table 4)。なお、各観測点を世界地図にプロットしたものを、Figure 12 に示した。

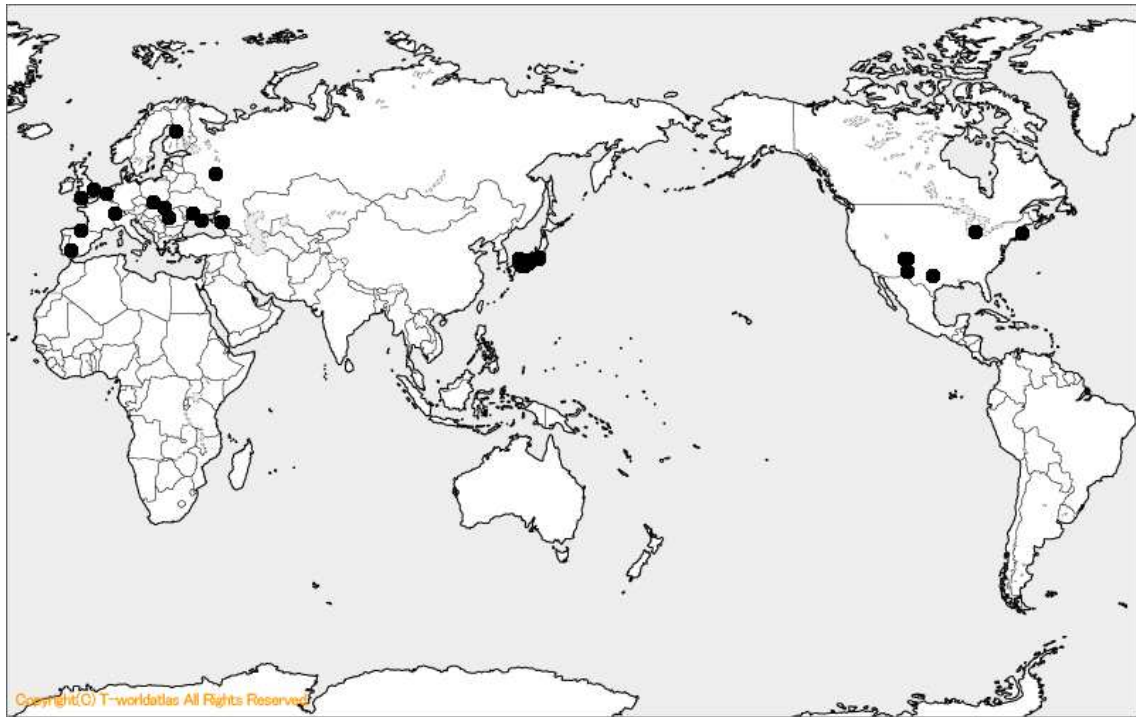


Figure 35: ER UMa の観測キャンペーンの行われた観測地点を世界地図にプロットしたもの。なお、世界地図は、[http://www.sekaichizu.jp/atlas/worldatlas/p800\\_worldatlas.html](http://www.sekaichizu.jp/atlas/worldatlas/p800_worldatlas.html) で公開されているものを用いた。

Table 1: Log of observatories

The key to Observer	Observer or Observatory Name	Instrument	Comp
KU	Kyoto University	40cmSCT+ST-9E	1
Aka	Akazawa Hidehiko	28cmSC,35.5cmSC + ST-7XE, ST-9XE	1,4,5
AKz	Astrokolkhov team <sup>a</sup>	30cmSC+ST-9 , 35cmSC+ST-8	2
APO	Apache Point Observatory	50cmC+SITe	6
BBo	Boyd Boitnott	28cmSC+QSI-516wsg	6
CRI	Crimean Astroph. Obs.	60cm+Apogee Alta E47	6
deM	Enrique de Miguel	28cmSC/25cmL + QSI-516wsg	2
DPV	Pavol A. Dubovsky	28cmL+DSI ProII	6
Ham	Frantz-Josch Hambsch	40cm+STL11	2
Ioh	Itoh Hiroshi	30cmSC+DSI-Pro	6
IMi	Ian Miller	35cmSC+SXVR-H16	1,2,11
Kai	Kasai Kiyoshi	28cmSC+ST-7XME	1,4
Kra	Tom Krajci	28cmSC+SBIG ST-8	6
LCO	Colin Littlefield	28cmSC+ST-8XME	5,13,14
Mhh	Hiroyuki Maehara	25cmL+ST-7XME	4
NDJ	Nick James	28cmSC+SBIG ST-9XE	2
NKa	Natalia Katysheva	50cmR, 14cmC+ST-10XME	1,2,4,6, 8,9,10,12
OKU	Osaka Kyoiku Univ.	51cm+ST-10	1
OUS	Okayama Univ. of Sci. team	23.5cmSC+ST-8	6
PSD	Stefano Padovan	25cm epsilon+ST-10XME	1,3,8, 10,13,15
Pol	Polaris Observatory	ST-7E	4

1: GSC 3439.629, 2: GSC3439.920 3: TYC2-3439.1287.1 4: TYC2-3439.1099.1  
5: TYC3439.1253.1 6: GSC3439.669 7: GSC3439.816 8: GSC3439.957  
9: TYC3439.1211.1 10: GSC3439.745 11: USNO1350.07816004  
12: GSC3439.1105 13: GSC3439.911 14: TYC2-3439.916.1  
15:GSC3439.1091 16: TYC2-3439.885.1  
<sup>a</sup>:F. J. Hambsch and T. Krajci による。  
<sup>b</sup>:Natalia Katysheva による。

Table 1: Log of observatories

The key to Observer	Observer or Observatory Name	Instrument	Comp
Rui	Jevier Ruiz	0.4mRC+ST-8XME	1
Sac	Seikei High School	15.2cmR+ST-9E	5
Shu	Sergey Shugarov	50cmR, 14cmC+ST-10XME	1,2,4,6, 8,9,10,12
Siz	Siokawa Kazuhiko	35SC+ST-9E	4
SAO	Special Astrophysical Observatory <sup>b</sup>	1m+EEV CCD42-40'	1,2,4,6, 8,9,10,12
SWI	William Stein	C14+SBIG ST-10XME	2
Ter	Terskol Observatory	C14+STL1001	6
Vir	Jani Virtanen	C14+SBIG ST-10XME	6
VIR	Natalia Virnina	60cm	6
Vol	Irina Voloshina	60cmL+Apogee 47	11

1: GSC 3439.629, 2: GSC3439.920 3: GSC3439.1287 4: TYC2-3439.1099.1

5: TYC3439.1253.1 6: GSC3439.669 7: GSC3439.816 8: GSC3439.957

9: TYC3439.1211.1 10: GSC3439.745 11: USNO1350.07816004

12: GSC3439.1105 13: GSC3439.911 14: TYC2-3439.916.1

15:GSC3439.1091 16: TYC2-3439.885.1

*a*: F-J. Hambsch and T. Krajci

*b*: Natalia Katysheva による。

# Chapter 4

## 観測結果と議論

### 13 長期的な光度変化

2011–2012 年の観測から得られた ER UMa の光度曲線を Figure 36 に示す。2011 年、2012 年とも、3 回の superoutburst が観測されている。また、それらの間に 4–5 度の normal outburst が観測されている。これらの観測された outburst のリストは Table 3 にまとめられている。2012 年についてはこのほかに、4 度目の superoutburst の可能性のある outburst が報告されているが、シーズンが終了に近い時期のためにあまり観測がないためにここでは扱わない。なお、これ以降 2011 年のスーパーアウトバーストを 2011 S1–3、2012 年のスーパーアウトバーストを 2012 S1–3 と称する。また、その間に観測されたアウトバーストを、時系列順に、例えば 2012 N1–1,2,3... と称することにする。スーパーアウトバーストの生じる間隔は、44–58 日の間である。これらの値は Zemko et al. (2013) によってまとめられた長期的な変化によく合う。superoutburst と superoutburst には含まれた区間では normal outburst が見られる。これらの normal outburst については、normaloutburst を繰り返すにつれて極大光度は明るくなっていき、また normal outburst の起こる間隔は次第に長くなっていく傾向がみられる。ただし、2012 N1–2 と 3 の 2 つの normal outburst の間隔はその次の 2 つの normal outburst、2012 N1–3 と 4 の間隔よりも短い。なお、以後 normal outburst $Nn-1,2...$  を含む superoutburst と superoutburst には含まれた区間を supercycle  $n$  と称するものとする。つまり、上記の normal outburst がみられる区間は supercycle 2011 S1 である。



Table 2: List of superoutbursts

ID	superpoutburst 開始 BJD-2400000)	superoutburst 極大 (BJD-2400000 )	極大光度 (等)	supercycle の長さ (日)
2011 S1	55578 <sup>a</sup>	-	12.6 <sup>a</sup>	-
2011 S2	55622.0	55625.1	12.7	44
2011 S3	55671.9	55674.4	12.7	50
2012 S1	55927 <sup>a</sup>	55929 <sup>b</sup>	12.9	58 <sup>c</sup>
2012 S2	55981.3	55982.6	13.0	54
2012 S3	56033.8	56034.4	12.9	53
2012 S4	-	56088.9 <sup>d</sup>	-	55

*a*: VSNET に報告されたモニター観測による。

*b*: 正確な時刻は観測が欠けているために明らかではない。

*c*: この前回の superoutburst の開始した時期は VSNET に報告されたモニター観測によっている。

*d*: 観測が少ないため、開始時刻ではなく極大時刻を採用している。

Table 3: List of normal outbursts

ID	Cycle length <sup>a</sup> (d)	outburst 開始 (BJD-2400000)	極大 光度
2011 N1-1	-	55592.2	13.6
2011 N1-2	5.7	55597.9	13.5
2011 N1-3	6.6	55604.5	13.4
2011 N1-4	6.6	55611.1	14.3
2011 N1-5	4.0	55615.1	13.3
2011 N2-1	-	55644.7	13.6
2011 N2-2	5.5	55650.2	13.4
2011 N2-3	6.7	55656.9	13.5
2011 N2-4	7.2	55664.1	13.2

*a*: 前回の outburst からの長さ。

*b*: 観測が少ないため、増光開始ではなくアウトバーストの極大付近にいる時で測っている。

*c*: 次の superoutburst の precursor outburst。

*d*: superoutburst の疑いあり。

*e*: あまり 確実ではない。

Table 3: List of normal outbursts

ID	Cycle length <sup>a</sup> (d)	outburst 開始 (BJD−2400000)	極大 光度
2011 N3-1	-	55693.3	13.7
2011 N3-2	4.8	55698.1	13.6
2011 N3-3	7.4	55705.5	13.6 <sup>b</sup>
2011 N3-4	6.8	55712.3	13.4
2011 N3-5 <sup>c</sup>	9.0 <sup>b</sup>	55721.3	13.2 <sup>b</sup>
2012 N0-1	-	55900.5	13.6
2012 N0-2	9.0	55909.5	13.5
2012 N0-3	9.5	55919.0	13.4
2012 N1-1	-	55946.3	13.9
2012 N1-2	5.9	55952.2	13.7
2012 N1-3	8.9	55961.1	13.8
2012 N1-4	8.0	55969.1	13.5
2012 N2-1	-	55998.8	13.5
2012 N2-2	5.9	56004.7	13.9
2012 N2-3	8.2	56012.9	13.9
2012 N2-4	9.3	56022.2	13.5
2012 N2-5	9.4	56031.6 <sup>d</sup>	13.5
2012 N3-1	-	56051.0 <sup>e</sup>	13.7
2012 N3-2	6.4	56057.4 <sup>e</sup>	13.8
2012 N3-3	6.5	56063.9 <sup>e</sup>	13.7
2012 N3-4	6.7	56070.6 <sup>e</sup>	13.7
2012 N3-5	11.3	56081.9 <sup>e</sup>	14.2
<i>a</i> :前回の outburst からの長さ。			
<i>b</i> :観測が少ないため、増光開始ではなくアウトバーストの極大付近にいる時で測っている。			
<i>c</i> :次の superoutburst の precursor outburst。			
<i>d</i> :superoutburst の疑いあり。			
<i>e</i> あまり 確実ではない。			

以後、それぞれの supercycle について概観をのべることにする。

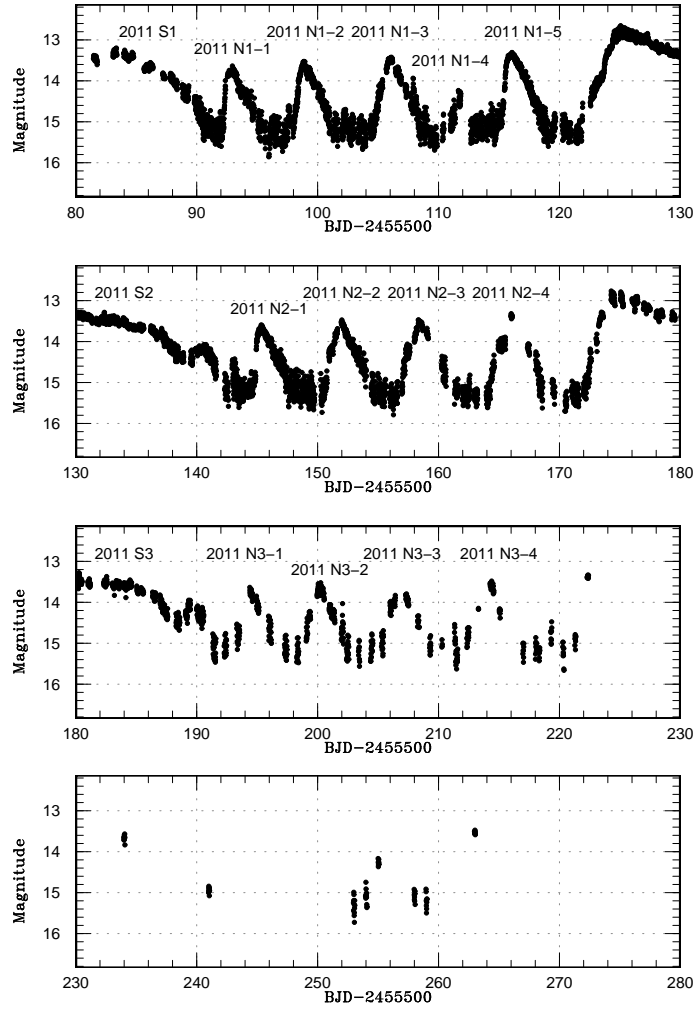


Figure 36: 2011 年シーズン全体の光度曲線。0.01 日で binning してある。

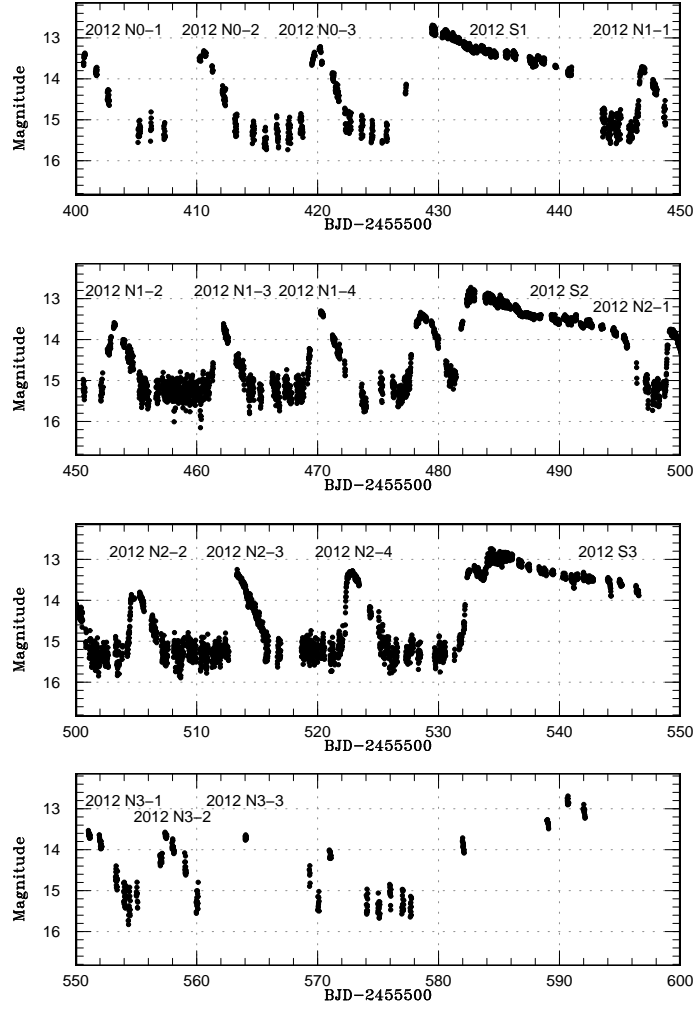


Figure 37: 2012 年シーズン全体の光度曲線。0.01 日で binning してある。

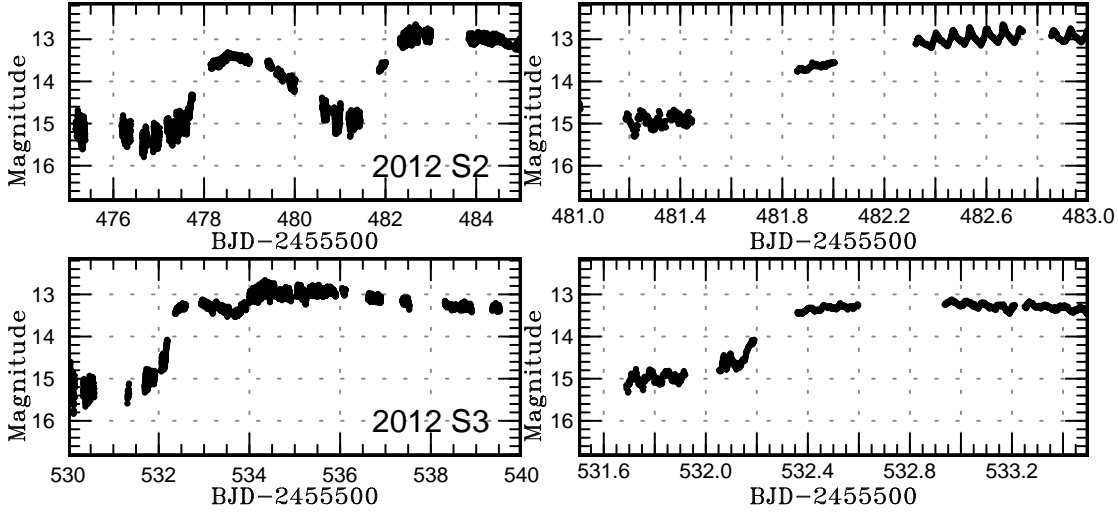


Figure 38: Supercycle 2012 S2 と 2012 S3 の増光時の光度曲線を拡大したもの。

### 13.1 Supercycle 2011 S1

2011 S1 の superoutburst は、negative superhump が観測された最初の superoutburst であるアウトバーストの報告から 3 日して、高速測光観測が始められた。最初のアウトバーストの報告ののち、おそらく 13–15 日の間アウトバーストは継続した。superoutburst が終了した 2 日後に次の normal outburst 2011 N1-1 が開始した。

この supercycle では、4 度の normal outburst が観測された (BJD 2455592, 2455597, 2455604, 2455615)。これらの他に、アウトバーストの振幅が小さく (1 等)、おそらくは極大に達するまで outburst が発達する前に減光してしまった failed outburst と考えられるものが 1 度 (BJD 2455611) 起きている。

### 13.2 Supercycle 2011 S2

superoutburst 2012 S2 は立ち上がりは normal outburst 状に始まった。これは superoutburst が normal outburst がして開始ほぼ極大近くまで達した後に引き起こされたものと考えられる。アウトバーストの立ち上がりが始まってから superoutburst の極大に達するまでに 4 日を要した。

superoutburst 2012 S2 は 16 日間継続した。極大に達してから 14 日が経過した BJD 2455642 に、減光を一時的にやめ、再びおよそ 0.5 等級明るくなった、これは、

superoutburst が完全に終了する前に次の normal outburst が起きたためだと思われる。

superoutburst が終了後、4度の normal outburst が起きた (BJD 2455644, 2455650, 2455656, and 2455664)。

### 13.3 Supercycle 2011 S3

superoutburst 2011 S3は増光中の normal outburst が superoutburst に成長すると言ったことで起こった。この superoutburst 2012 S3はその後 16 日間継続した。superoutburst が極大に達した 13 日後の BJD 2455688 に、2011 S2 と同様に減光が一時的に停止し、再び 0.5 等ほど増光した。この superoutburst が終了したあと、少なくとも 4 回の normal outburst が見られた (BJD 2455693, 2455698, 2455705, 2455712)。また、それとは別に 1 度 outburst がみられたが、supercycle の長さから考えるとこれは normal outburst ではなく superoutburst である可能性がある。この supercycle についてはシーズンが終了に近かったために観測が十分ではなく、normal outburst の振る舞いについては明らかではない。

### 13.4 Supercycle 2012 S0

我々のデータの中で、2012 年のシーズン最初の superoutburst が高速測光観測される以前に 3 度の normal outburst (BJD 2455900, 2455909, 2455919) が観測されている。VSNET によせられたモニター観測ではそれより以前 (BJD 2455869 頃) にその 1 度前の superoutburst が観測されているが、この superoutburst では高速測光観測はなされていないために短周期変動については論ずることができない。ここではこの supercycle を supercycle S0 と呼ぶことにする。

### 13.5 Supercycle 2012 S1

増光の立ち上がりに当たる時期と減光に当たる時期がともに欠測期間にあたるために、supercycle 2012 S1 の正確な長さは不明である。しかし、減光が BJD 2455941 と BJD 2455943 の間に起きたこと、superoutburst 開始後の BJD 2455962 に行われた最初の観測ですでに極大光度に達しており、superoutburst の継続期間は 15 日程度であると考えられる。この superoutburst の終了後、4 度の normal outburst が観測された (BJD 2455998, 2456004, 2456012, 2456022)。これらは純粋な normal outburst であるが、これとは別に BJD 2456031 に normal outburst がみられた。この normal outburst は、減光しほぼ静穏光度まで近づいたのちに次の superoutburst (2012 S2) が引き起こされた。そのため、この outburst は次の superoutburst の precursor outburst であると解釈される。

## 13.6 Supercycle 2012 S2

superoutburst 2012 S2 は、ほぼ終結に近い状態の normal outburst から引き起こされた superoutburst という点で興味深いものである (Figure 38 のうち上の図を参照)。2012 S2 の継続期間は 14 日であった。superburst 2012 S2 が終了したのち、4 回の normal outburst が観測された (BJD 2456051, 2456057, 2456063, 2456070)。これら 4 度の normal outburst のうち、はじめの 2 度では、はっきりと極大光度が異なるという特徴がある。

## 13.7 Supercycle 2012 S3

2012 S3 は、normal outburst が極大に達した直後に superoutburst へと成長していくという典型的な superoutburst である [Figure 38 のうち下の図を参照。また、このような典型的な superoutburst の成長は Osaki and Kato (2013a) に Kepler 衛星の観測による V1504 Cyg の例が示されている]。この superoutburst では減光時期が欠測期間に当たっているために我々のデータだけでははっきりとアウトバースト期間について論ずることができない。しかしながら、VSNET によせられたモニター観測データによると、この時期 ER UMa は BJD 2456048–2456049 に減光していたとの報告があるこのことから、superoutburst 2012 S3 の継続期間は 14–15 日であると考えられる。superoutburst 終了後、4、または 5 度の normal outburst が観測された (BJD 2456051, 2456057, 2456063, 2456070, and 2456081)。しかしながら、5 度目の normal outburst (BJD 2456081) は欠測のために normal outburst か次の superoutburst の precursor outburst なのか判別できない。しかしながら、いずれにせよ、この 2012 S3 から以後は観測シーズンの終了に近いために十分な観測は得られていない。

# 14 Normal Outburst における特徴

## 14.1 Normal Outburst の頻度

1 つの supercycle の間に含まれる明確な normal outburst は 4 回ないしは 5 回である (Table 3)。Zemko et al. (2013) で示されているように、1 度の supercycle に含まれる normal outburst の回数は長期的には変動することが知られている。それゆえに、normal outburst の頻度について二つの phase があることされる。すなわち、一つは 1 supercycle あたりの normal outburst の数が少なく、normal outburst の間隔の長い L-type cycle (この名前は Smak (1985) により、「長い」normal outburst 間隔に由来する)。また、もう一つは 1 supercycle あたりの normal outburst の数が多く、normal outburst の間隔は短い S-type cycle (L-type outburst と同様に Smak (1985) により、「短い」normal outburst 間隔に由来する) である。ER UMa の場合、S-type outburst

の時期には 1supercycle についておよそ 6 回の normal outburst が観測されている。2011, 2012 年のシーズンは L-type outburst の時期に当たる。ただし、この値は減光がほぼ終了してから superoutburst へと成長したと考えられる precursor を含まない。また、2011 S2 や 2011 S3 の最後の時期に付随する superoutburst が終了する前に開始した normal outburst も含まないものとする。これは、normal outburst の頻度についての研究は多くがモニター観測を元にしており、これらの normal outburst を superoutburst の一部とみなさないで分離することは難しいと考えられるために、過去の研究と比較する上で適当でないと考えられるためである。

## 14.2 Normal Outburst における増光速度

2012 S2 と 2012 S3 は明らかに precursor outburst が付随しており、それによって superoutburst が引き起こされたと考えられる。その一方で 2011 S2, S3 では precursor outburst が付随していない。これらの増光ステージでは一時的に増光速度の変化が起き、そこから superhump が成長していく例が見られる。

図 39 はそれぞれの supercycle に起きた normal outburst の増光の様子についての比較である。なお、増光の開始を 0 日になるように横軸を揃えてある。supercycle 2011 S2 の間に見られる normal outburst では、最後の 2011 N1-5 を除き、outburst を重ねるに連れて増光速度が遅くなっている。supercycle 2012 S2 の場合 2012 N2-1 では増光開始後極大に達するまでに 0.5 日ほどしかかかっていないにも関わらず、2012 N2-5 では極大に達するまでに 4 日かかっている。しかし、それにもかかわらず supercycle 2011 S1 の場合も supercycle 2011 S2 の場合もそこに含まれる normal outburst の継続期間は failed outburst の可能性が高い 2011 N1-4 を除きほぼ一定である。つまり、このことから一つの supercycle の間に含まれる normal outburst は回数を重ねるごとに、増光速度が速く減光速度の遅い “outside-in outburst” [このタイプの outburst は、Smak (1984) では “type-A outburst” とも呼ばれている] から増光速度が遅く減光速度が速 “inside-out outburst” [Smak (1984) ではこのタイプのアウトバーストは “type-B outburst” と呼ばれる] への変化が生じている。2011 N3-1 から N3-4 への変化でも同様の結果が見られるけれども、N3-2 から 4 の間にはほぼ一定の増光速度である。

このような傾向は、2011 年の観測では顕著だが、2012 年の場合にはあまり明確ではない。これは、部分的には 2012 年の観測では増光にあたる時期の観測が 2011 年ほど多くないためでもある。しかし、2012 N1-5 では同様の傾向が見られるまた、2012 N2-2-5 では同様の傾向が見られるが、その変化はあるとしても少ない (増光に要する時間が 0.2 日から 0.6 日に変化したにすぎない)。Figure 40 は、それぞれの supercycle についての増光速度の変化を示す。ただし、2012 S0 については増光ステージがほとんど観測されておらず、議論することが難しいので省いた。しかしながら、上の傾向は 2012 年では 2011 年ほどは明確ではない。



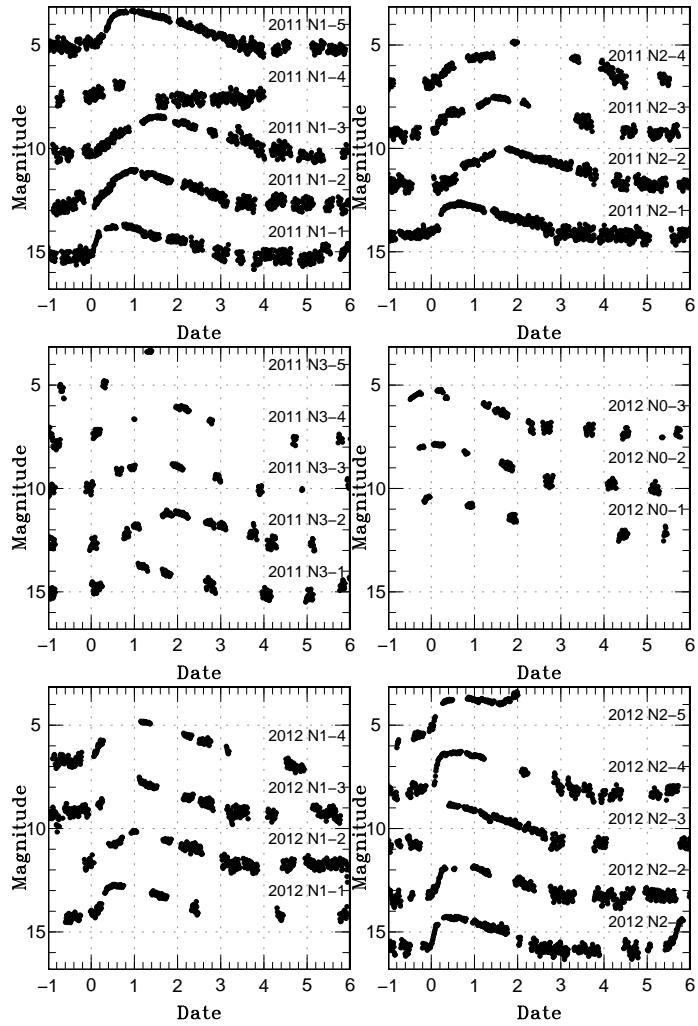


Figure 39: 各 normal outburst の増光部分に当たる部分。横軸の0日は原則として増光の開始時刻に相当すると推定される点で揃えているが、supercycle 2012 S0については normal outburst の増光部分に相当する観測を欠いているものが多く増光開始時の推定が困難なため、アウトバーストの極大と推定される点をゼロ点としている。

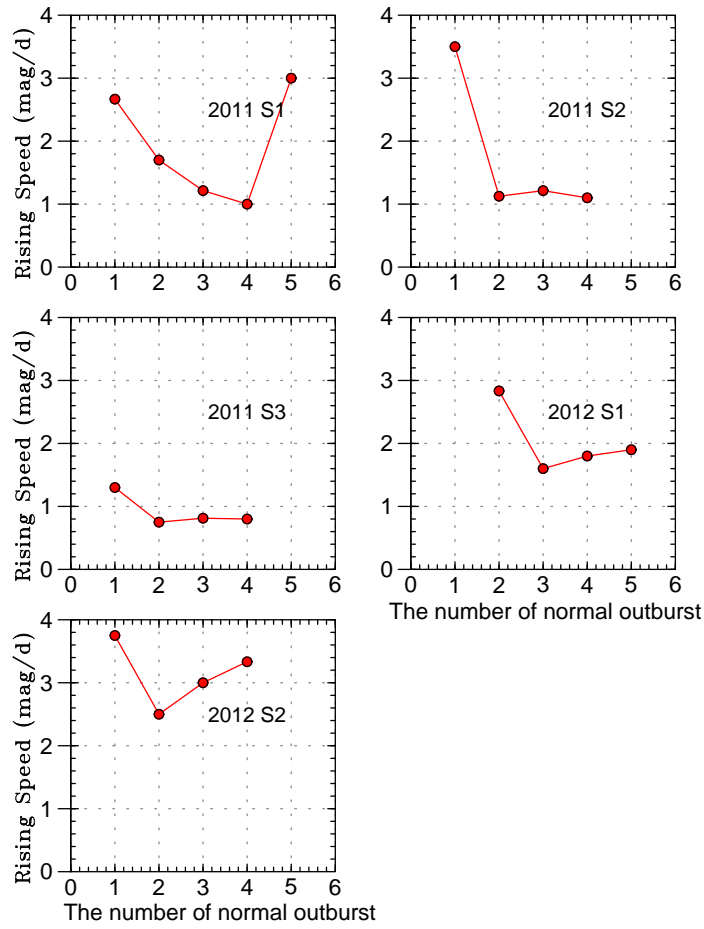


Figure 40: 各 supercycle について、normal outburst の増光スピードの変化を示す。ただし、増光開始時が明確でない場合増光スピードを求めることが困難なので、それらについては省いている。

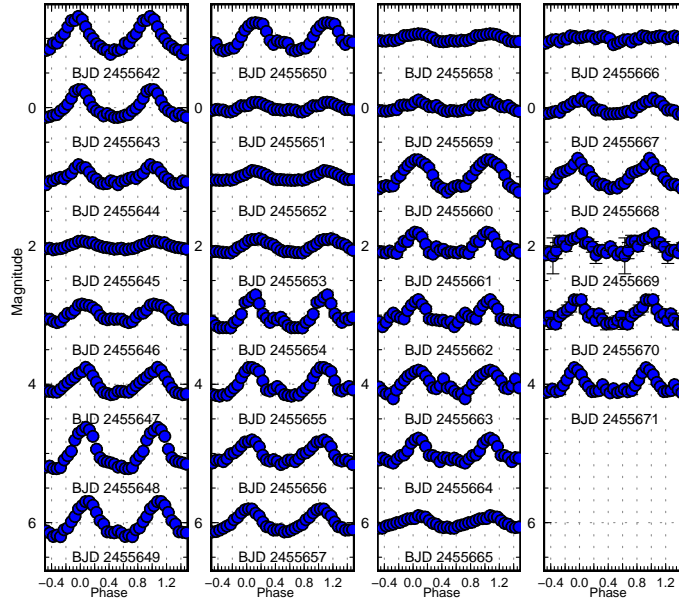


Figure 41: supercycle 2011 S1 の negative superhump について、0.0622 日で folding した位相平均をとったもの。

## 15 Negative Superhump

2011 年 1 月の superoutburst 中の観測データを用いて周期解析を求め、得られた結果を Figure 42 に示す。この図に示されているグラフのうち、(a) は Phase Dispersion Minimization (PDM) 法を用いて求めたものである (Stellingwerf, 1978)。PDM 法によって得られた結果は、もっとも確からしい周期として 0.06226 日を得た。また、(b) は Markov-chain Monte Carlo (MCMC) を用いて求めた周期についての密度関数 (posterior probability density) である。これによって得られた 99% 確実な周期とその誤差範囲は  $0.0622804^{+62}_{-66}$  日であった。このうち、MCMC で得られた周期を用いて folding した位相平均光度曲線を (c) に示す。

ER UMa の軌道周期は 0.06366 日であること (Thorstensen et al., 1997) およびこれまでに報告されている通常の superhump の周期が 0.06549–0.06573 日であることから (Kato and Kunjaya, 1995)、この検出された周期は軌道周期にくらべて 2.2% 短い。このことから、この変動は negative superhump であると考えることが出来る。

観測キャンペーンを行った 2011, 2012 年の間を通じて、ER UMa にはこの negative superhump が観測された。negative superhump は 静穏時・normal outburst 時だけ

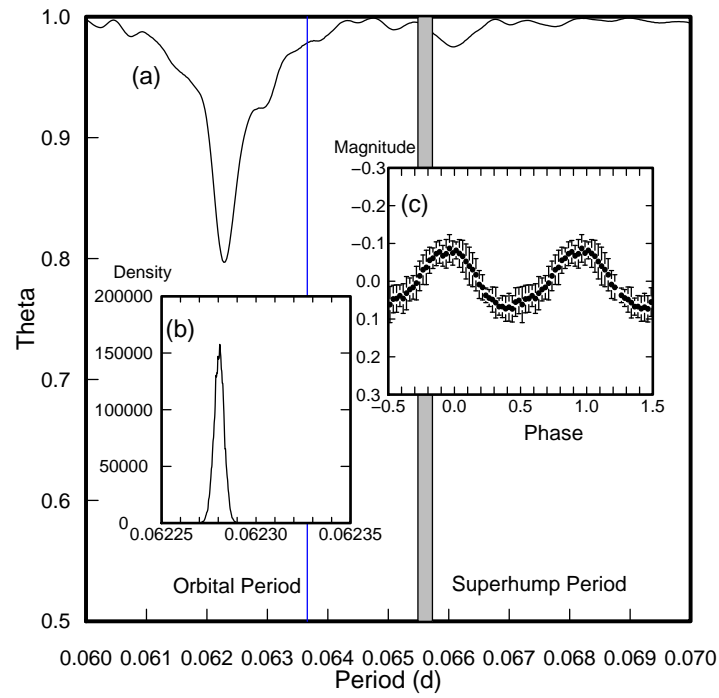


Figure 42: 発見当時のデータから得られた周期解析。図に示されているグラフについての詳しい説明は本文参照。

でなく、superoutburst の最中でもごく初期を除き観測されている。

Supercycle 2011 S1 の間の negative superhump を日毎に 0.0622 日で folding した位相平均光度曲線を Figure 42 に示す。negative superhump の振幅は静穏時で 0.5–1.0 等である。静穏時とアウトバースト時では振幅が異なり、後者の方が小さい。しかし、このような振幅の変化は等級スケールでははっきり見られるが、flux スケールに換算した場合、その振幅の変化はあまりアウトバースト時でも静穏時でもみられない。これについては後述する。イントロダクションで記述したように、negative superhump が円盤の傾きによって引き起こされているものと解釈した場合、その周期は連星系の質量比と円盤の公転面からの傾き、および円盤の半径  $R_d$  の関数として表される。このうち、質量比は系について観測のタイムスケールでは大きく変動するものとは考えにくい。また、円盤の傾きも同様に大きく変動するとは考えにくいこと、および傾き  $\theta$  が小さい場合この項の影響は小さいため、アウトバースト中の周期の変化に影響しているものは主に円盤の半径によるものと見ることが出来る。

当論文ではこの negative superhump の周期の時間発展を  $O-C$  カーブと PDM 法の組み合わせ、及び Lasso を用いた二次元周期解析の二つの方法を用いてとらえることを試みた。

## 15.1 $O-C$ 解析

$O-C$  カーブを作成するため、私たちは negative superhump の極大時刻をとらえることを試みた。極大時刻を求める方法として、極大部分のテンプレートとなる光度曲線をデータにあて、非線形回帰によってもっとも確からしい極大時刻を求める方法を採用した (Kato et al., 2009)。ただし、Kato et al. (2009) ではこの手法を適用した変動は positive superhump であり、今回極大時刻を求めようとしているものは negative superhump であるため、変動のプロファイルが異なる。そのため正確な極大時刻を求めるためには、用いるプロファイルとして negative superhump のものを採用する必要がある。そこで採用する negative superhump のプロファイルとして、ER UMa の静穏時の光度曲線を元にテンプレートを作成し、それを元にして極大時刻を求めた。テンプレートに使うデータとしては、キャンペーン開始後最初の 2011 S1 と、その次の superoutburst である 2011 S2 の間の supercycle 2011 S1 のうち、静穏時期のものを選んだ。このデータ全体を PDM 解析したところ周期 0.0623106 日が得られたため、この数字で折りたたんだものである。この手法を用いて得られた極大時刻のリストを Table 5 に示す。これらの得られた極大時刻について、各 Supercycle について一次の線形近似を行ってこれを予報式として  $O-C$  の値を求めた。

また、これとともに同様に上に相当するデータから少しづつ抽出範囲の範囲を動かしながらデータを抽出し、各データについて PDM 解析を行って得られたピークの変動を追うことも試みた。抽出範囲としては 5 日を採用し、この窓の範囲は 1 日づつずらしていったものを周期解析データとして用いた。

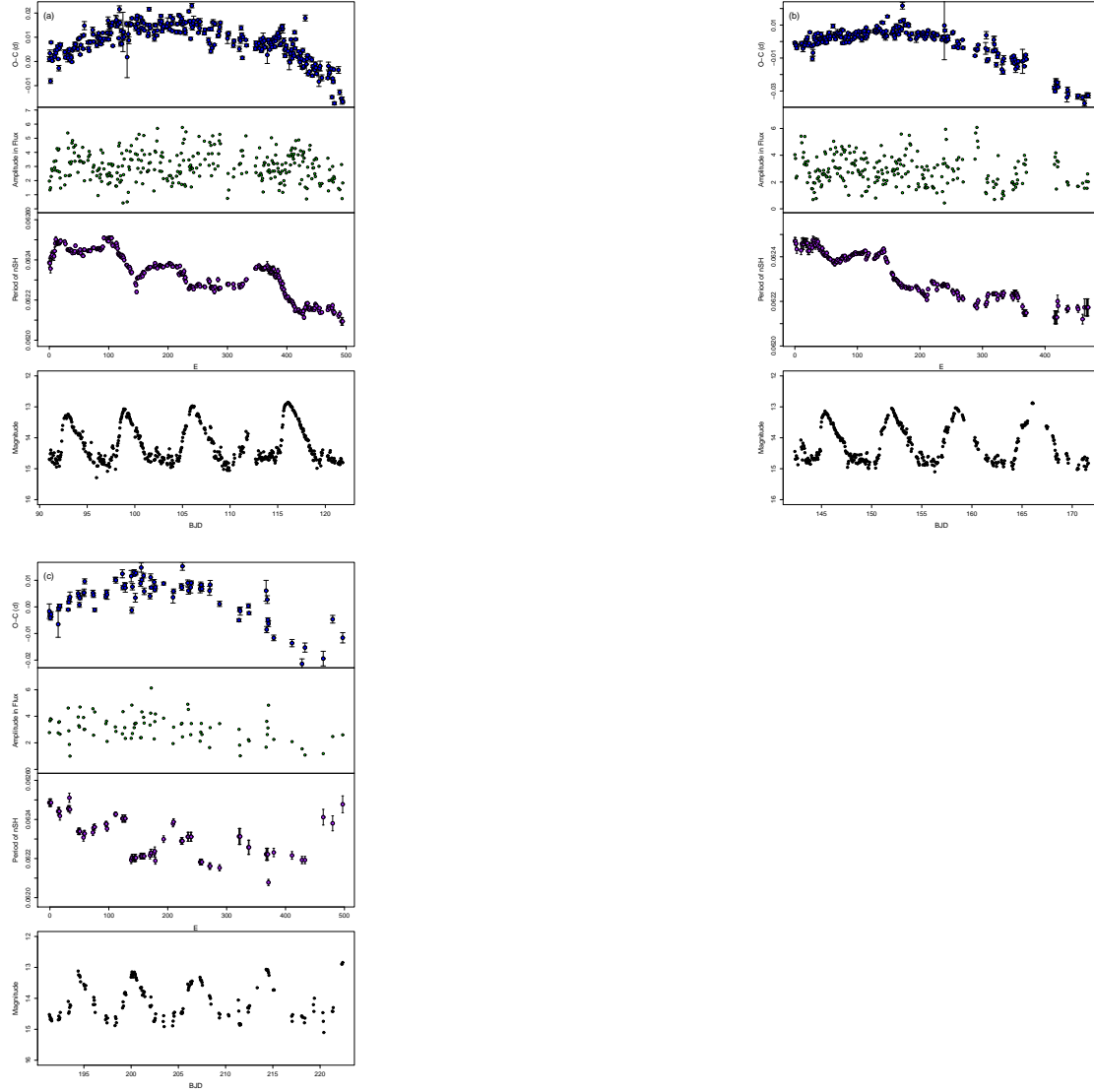


Figure 43: (a), (b), (c) はそれぞれ上から順に、(1) negative superhump の極大時刻から作成した  $O-C$  カーブ、(2) flux スケールに換算したときの negative superhump の振幅、(3) PDM 解析によって得た negative superhump 周期の時間発展、(4) 対応する光度曲線、をそれぞれ示し、(a) は supercycle 2012 S0、(b) は supercycle 2012 S1、(c) は supercycle 2012 S2 に相当する。また、 $O-C$  の値はそれぞれ  $2455591.020 + 0.062340E$  (2011 S1)、 $2455642.346 + 0.062339E$  (2011 S2)、 $2455691.405 + 0.062305E$  (2011 S3) という式から算出している。

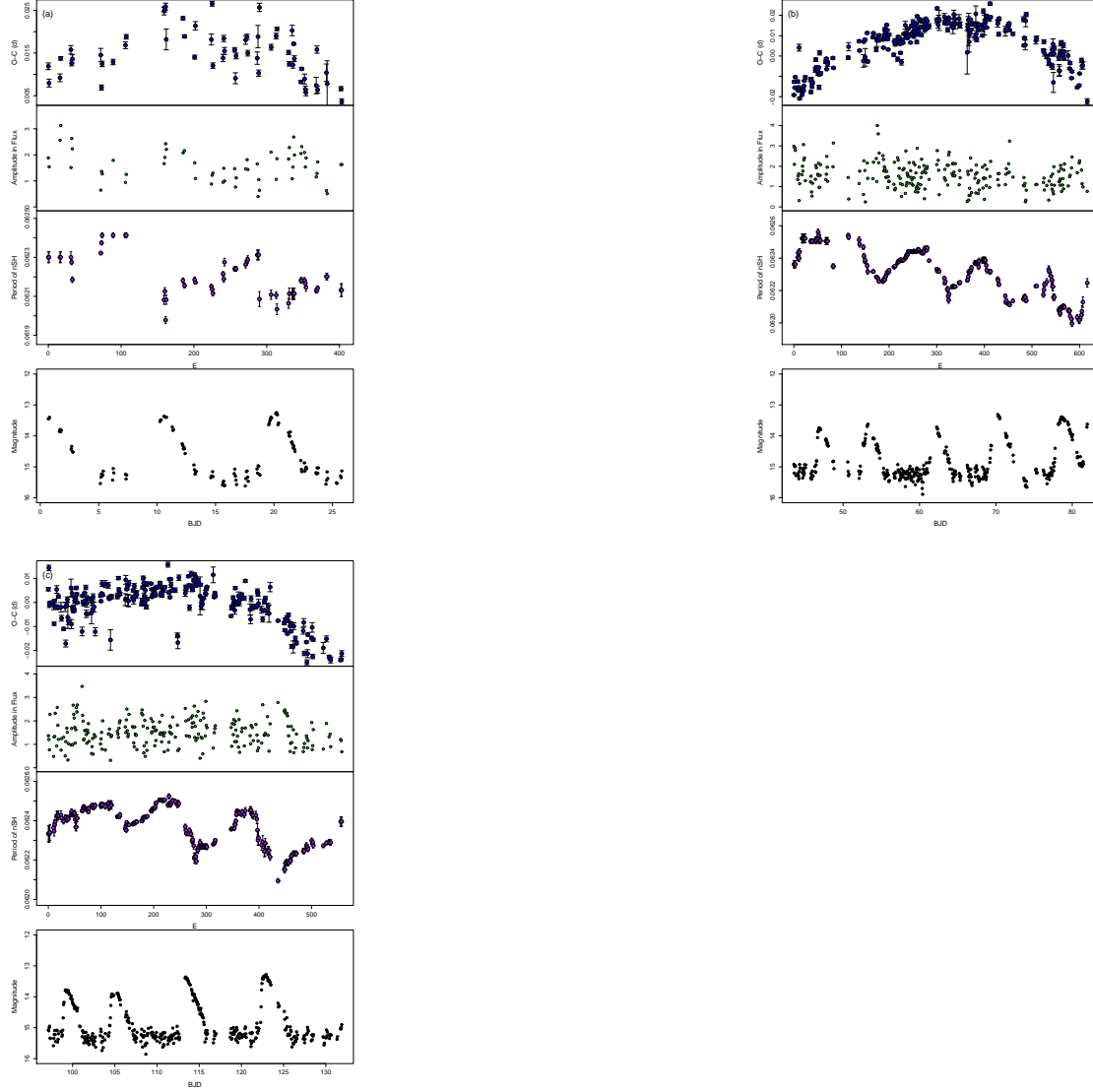


Figure 44: (a), (b), (c) はそれぞれ上から 順に、(1) negative superhump の極大時刻から作成した  $O-C$  カーブ、(2) flux スケールに換算したときの negative superhump の振幅、(3) PDM 解析によって得た negative superhump 周期の時間発展、(4) 対応する光度曲線、をそれぞれ示し、(a) は supercycle 2012 S0、(b) は supercycle 2012 S1、(c) は supercycle 2012 S2 に相当する。また、 $O-C$  の値はそれぞれ  $2455900.680 + 0.06223E$  (2012 S0)、 $2455943.576 + 0.0623E$  (2012 S1)、 $2455997.123 + 0.0624E$  (2012 S2) という式から算出している。

このようにして得られた  $O-C$  カーブと PDM により得られた周期の時系列変化を Figures 43, 44 に示す。 $O-C$  カーブが一段目、PDM によるものが三段目に示されており、これに相当する時期の光度曲線が四段目である。

これらの  $O-C$  図に示されたカーブは、下に凸の形状をしており、これは negative superhump の周期が次の superoutburst が近づくにつれて減少していることを表している。このことは、2つの連続した superoutburst の間の supercycle において見られる negative superhump について、 $\dot{P}_{\text{nSH}} < 0$  が成立することを示唆している。この  $\dot{P}_{\text{nSH}}$  の値は、2011 年で  $-1.10(6) \times 10^{-5}$  (supercycle 2011 S1),  $-1.32(4) \times 10^{-5}$  (2012 S2-3) (supercycle 2011 S2),  $-1.04(11) \times 10^{-5}$  (supercycle 2011 S3) である。また、2012 年については、 $-5(2) \times 10^{-6}$  (supercycle 2012 S0),  $-9.7(4) \times 10^{-6}$  (supercycle 2012 S1),  $-7.7(6) \times 10^{-6}$  (2012 S2) である。概ね、 $\dot{P}_{\text{nSH}}$  の絶対値は 2012 年の方が 2011 年よりも大きい。

しかしながら、Figure 44 に示されている  $O-C$  カーブは単純な放物線様ではない。これらの図の  $O-C$  カーブは長期的には下に凸の形状をしているが、より短いタイムスケールでは上に凸の  $O-C$  カーブがいくつも組み合わさっていた形をしているためである。このことは、supercycle 中の negative superhump の周期が長期的には減少する一方で、短いタイムスケールだと増加しており、それによる増加を上回る周期の減少が時間をおいて生じるために結果的に減少しているということを示している。

Figure 43, 44 の第 3 の図はそれぞれの supercycle について、negative superhump の周期の変化をとらえたものである。これらの値は、それぞれの点を中心として 5 日間のデータを抜きだし、PDM 解析して得たものである。これは、より複雑な周期変化を示していることをより短いタイムスケールで示している。これらの図は、 $O-C$  カーブから得られたのと同様の結果を示している。特に、周期の急な減少が数回起こり、これが周期の増加より顕著なために周期が全体では減少していることがこの図から見て取ることができる。また、これらの急な周期の減少はいずれも normal outburst が開始する際に起きていることがわかる。

## 15.2 Lasso 解析

2011 年と 2012 年の間を通じて観測されていた negative superhump の周期変化について、より詳しい時間発展について調べるために上の解析の他に二次元 Fourier 解析を試みた。まず outburst にともなう光度の変化を引くために重み付きで線形成分を引いた (LOWESS; Cleveland 1979)。なお、この操作を含めて統計解析には R software を用いた。その後、データ全体から中央の時刻を 1 日のステップでずらし、いきながら 10 日分を取り出しこれを時系列周期解析に使うデータとした。

我々はこのデータを周期解析するにあたって、least absolute shrinkage and selection operator (Lasso, Tibshirani 1996) と呼ばれる方法を採用した。これは近年天



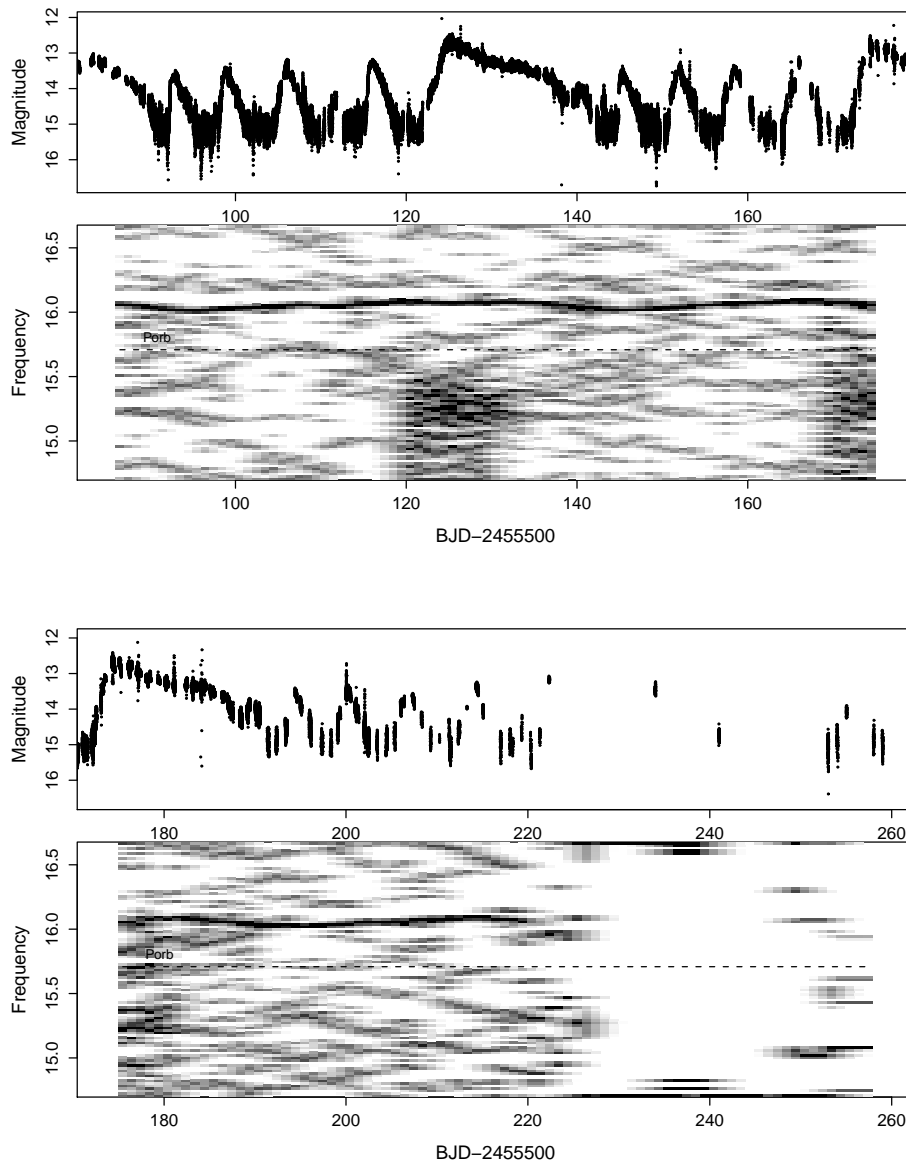


Figure 45: 2011 年のシーズンの間を通じての、ER UMa の観測データについての Lasso 周期解析の結果。データを抜き出す窓の広さは 10 日で、1 日ステップで動かしている。

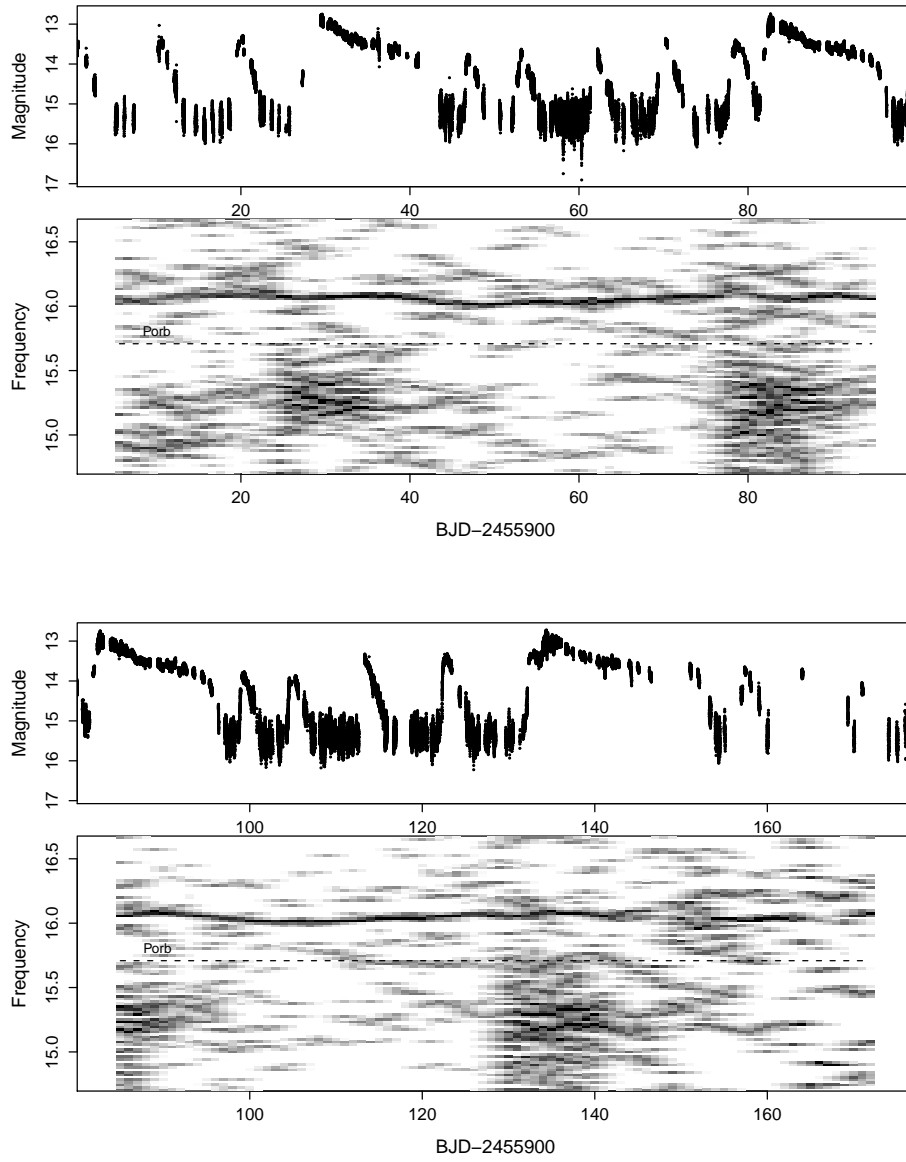


Figure 46: 2011 年のシーズンの間を通じての、ER UMa の観測データについての Lasso 周期解析の結果。データを抜き出す窓の広さは 10 日で、1 日ステップで動かしている。

文学における時系列解析のために使われ始めたものである (Kato and Uemura 2012; Kato and Osaki 2013c)。この手法によって得られるパワースペクトルは非常に鋭いピークをつくり、また通常の Fourier 解析に比べて等間隔でないサンプリングデータによる影響を受けにくいためにパワースペクトルのピークを検出するのに非常に適している手法で、矮新星のアウトバーストのような短いタイムスケールで周期が変化する場合を解析するためには非常に強力である。

Lassoによる解析の結果得られた2次元時系列スペクトルを Figures 45, 46に示す。これらの図は、明瞭な negative superhump の信号が 2011~2012 年のほぼ全期間を通じて観測されていることを示している。また、positive superhump が superoutburst の初期に強く見られる。negative superhump の振動数は supercycle の間を通じて変化しているが、16.1 c/d 付近である。また、negative superhump の振動数は superoutburst が終了した時に一番小さい値になり、そこから次の superoutburst に向かい次第に長くなっている。Kepler データでなされているもの (Osaki and Kato, 2013a) とは異なり、観測データに途切れがある部分があることを考慮してデータの抜きだし範囲を Osaki and Kato (2013a) で使われている 5 日でなく 10 日を使っている。normal outburst の間隔が 5~10 日であるため、ここでは normal outburst に伴う周期変化を追うことは難しいが、supercycle を繰り返すとともに negative superhump の周期も振動していることが伺える。

また、興味深いことに、2012 年の BJD 2456020–2456040 の間には軌道周期に相当すると考えられる信号が現れている。得られたデータ全体を PDM 解析することによって軌道周期が求められる可能性があるため PDM 解析にかけてみたが、有意な信号は見られなかった。これは、信号が一時的にしかみられなかったためであろうと考えられる。

Kato et al. (2013b) と Osaki and Kato (2014) は negative superhump の周期変化が V344 Lyr や V1504 Cyg では顕著に見ることができる一方で BK Lyn と ER UMa ではそれほどはっきり見られないということを示した。これは、これらの天体では増光間隔が短いため静穏時における negative superhump 周期の変化が起きる長さが短いために相対的に目立たないためだと考えられる。

### 15.3 Negative Superhump の振幅

Figure 41 の位相平均光度曲線は、negative superhump が outburst 時に振幅が減少し、静穏時には大きくなることを示している。しかし、系が明るくなると同じ明るさの変動でも相対的に目立たなくなるため、実際に negative superhump の絶対的な振幅がどのように変化している flux 単位に換算して比べる必要がある。16 等の時の 1 等の振幅を 1 として、negative superhump の各振幅の大きさをプロットしたものが Figures 43, 44 の二段目である。この図は、negative superhump の振幅とアウトバースト状態にあるか静穏状態にあるかについては相関がないことを示す。

## 15.4 Negative Superhump の周期発展についての考察

$O-C$  カーブを用いた解析と Lasso による解析結果はいずれも negative superhump 周期が次の superoutburst が近づくにつれて減少するという傾向を示す。しかし、 $O-C$  カーブや PDM 解析によって得られているような短いタイムスケールの変動としては静穏時には negative superhump の周期は長くなる一方で、normal outburst が開始するのに伴って negative superhump 周期の減少が生じる。normal outburst が開始する際の negative superhump の減少の度合いが静穏時の増加する度合いに比べて大きいため、これらの二つの効果が組み合わさって、negative superhump の周期は supercycle 全体では短くなる。

理論的には negative superhump 周期の増加は円盤の半径  $R_d/A$  の増加として解釈することができる。そのため、negative superhump の周期の変化は円盤の半径が normal outburst における増大とそれにつづく減少を繰り返しながら全体的には増大し、superoutburst とともに半径が減少するという傾向を示す。このような円盤の半径の変化は、Osaki and Kato (2013b) で提示されている V1504 Cyg における円盤の半径の変動によく似ている。

TTI model によれば、outburst の開始に伴う円盤半径の増加は角運動量の保存と粘性の増加に伴って生じる現象であるとされる (Osaki, 1989)。またアウトバーストが終了すると、円盤の半径は次のアウトバーストが開始するまで減少しつづける。このような傾向は我々の得た結果によく一致している。

## 16 Positive superhump

### 16.1 Positive Superhump と Negative Superhump の共存とそれによる問題点

Lasso によって求めた二次元周期解析のグラフ、Figures 45, 46 は 2011 年と 2012 年に得られた観測のうち superoutburst 中に対応する時期には positive superhump が存在していることを示す。2011 年 1 月の superoutburst の際に観測されたデータを元にした PDM 解析では (Figure 42) これに相当する信号は見られない。これは、2011 年 1 月の superoutburst の観測が superoutburst 開始から少し時間を置いて始められたため、positive superhump の信号が negative superhump の信号に比べて弱くなったために相対的に目立たなくなっていたためだと考えられる。

superoutburst 2011 S2 の開始付近にあたる時期の時期の変動について極大時刻を求め、 $O-C$  カーブと変動の振幅を示したグラフを superoutburst 2011 S2 についてみたものを Figure 47 に示す。この  $O-C$  カーブに上書きされている点線は軌道周期に一致する変動を示した場合の  $O-C$  カーブの傾きである。途中で突然変動の周期が変化しており、それ以前と以後で軌道周期より短かったものが軌道周期より

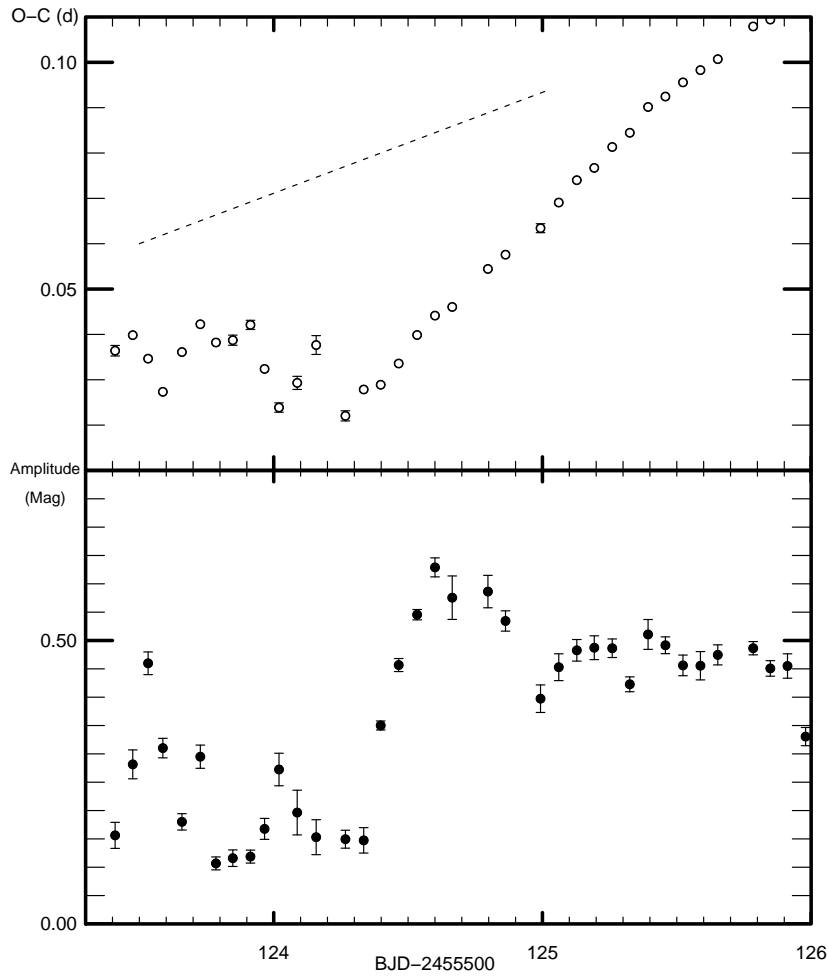


Figure 47: superoutburst 2011 S1 開始付近における変動の極大時刻に対する  $O-C$  カurveと変動の振幅。図の上のパネルは  $O-C$  の値、下のパネルは変動の振幅を示す。上のパネルの点線は軌道周期に対応する変化が見られたときの、 $O-C$  カurveの傾きがどうなるかを示す。

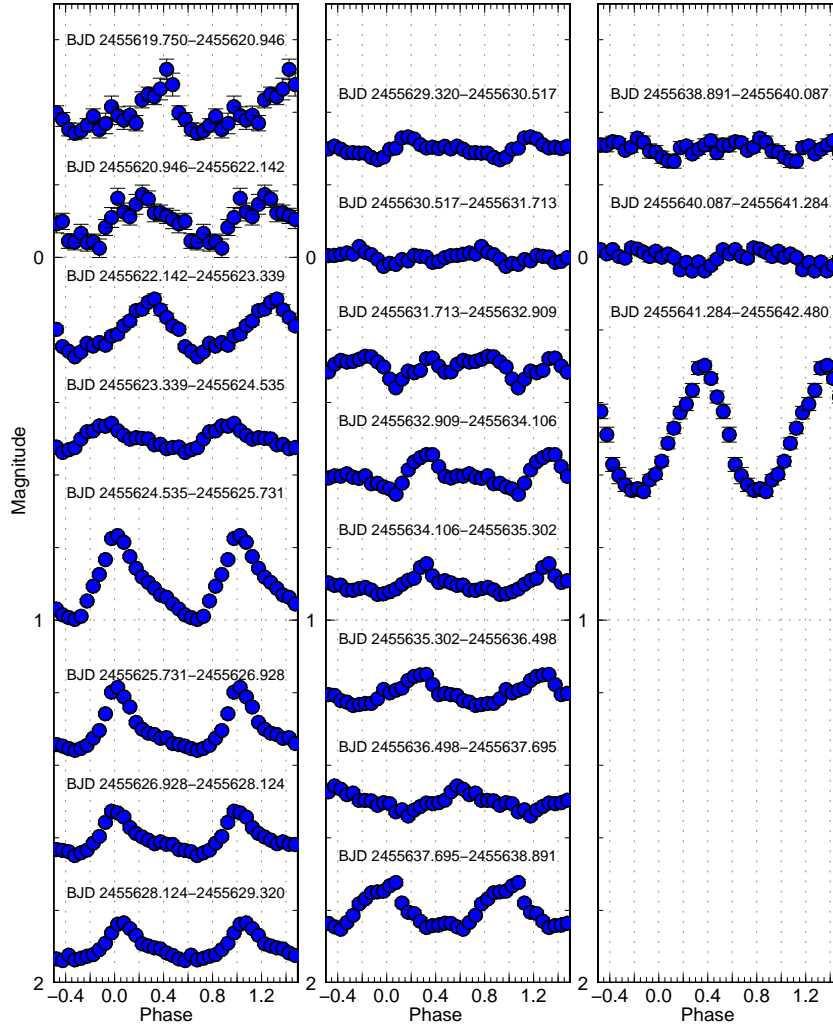


Figure 48: superoutburst S2 について、0.0622 日で folding して位相平均をとり、得た neagtive superhump の平均 profile。

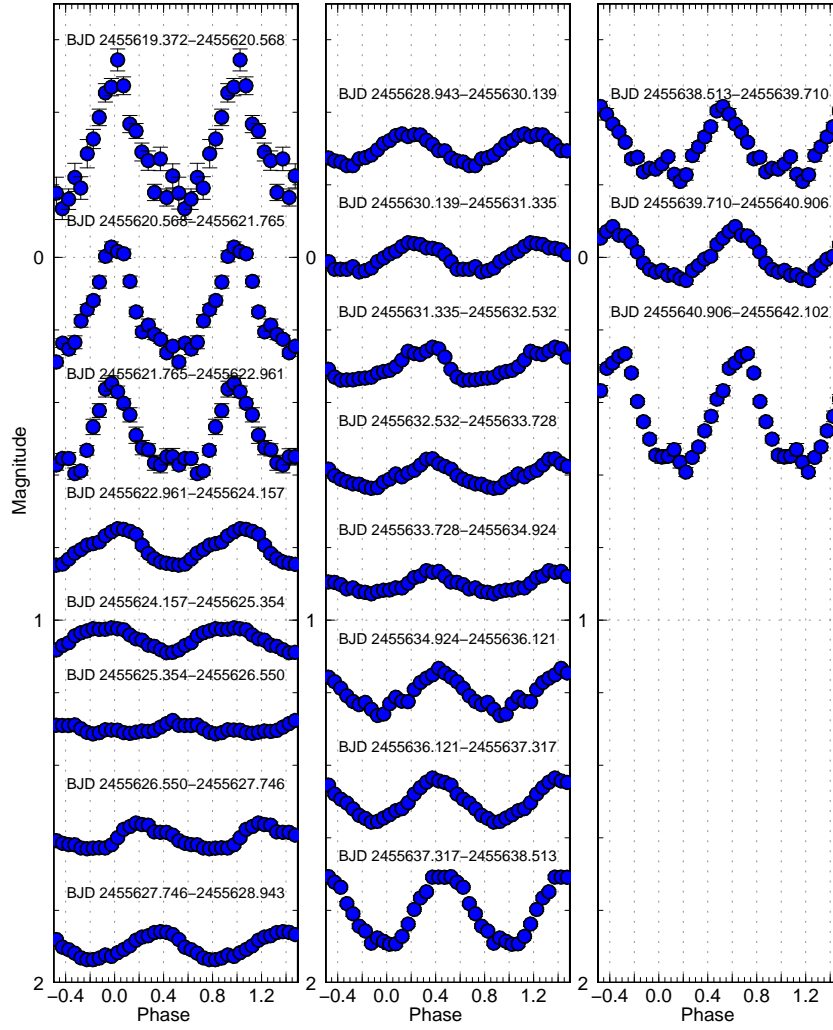


Figure 49: superoutburst S2 について、0.0655 日で folding して位相平均をとり、得た positive superhump の平均 profile。

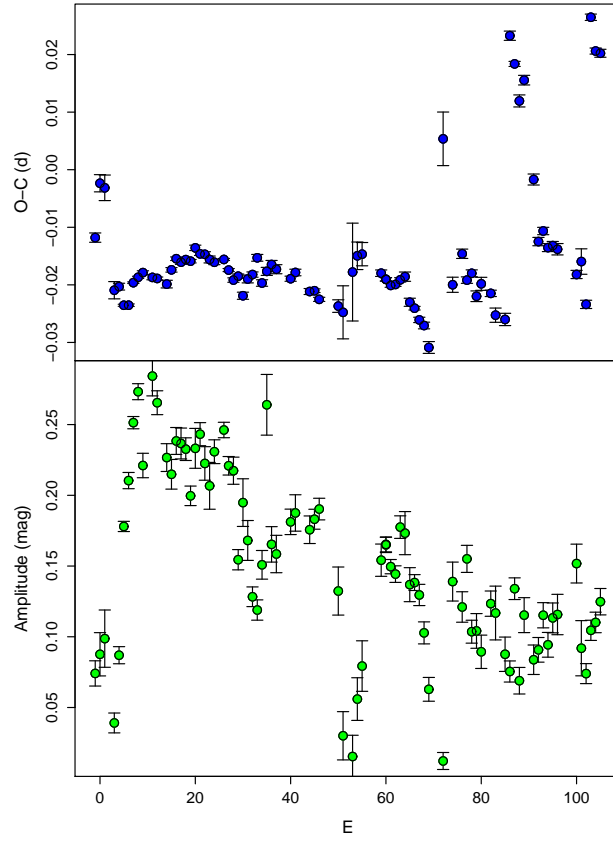


Figure 50: superoutburst 2012 S1における positive superhump に関する  $O - C$  カーブ。特に negative superhump の除去は行っていない。 $O - C$  の値は  $2455924.094 + 0.065619E$  に対するもの。



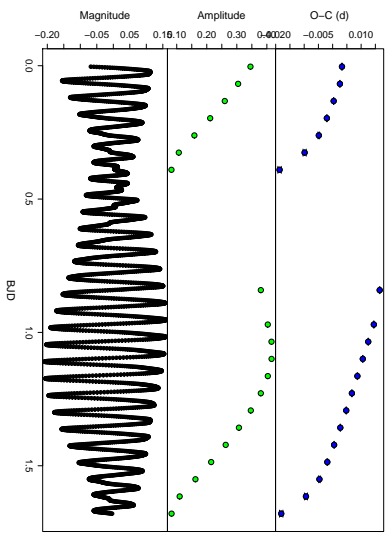
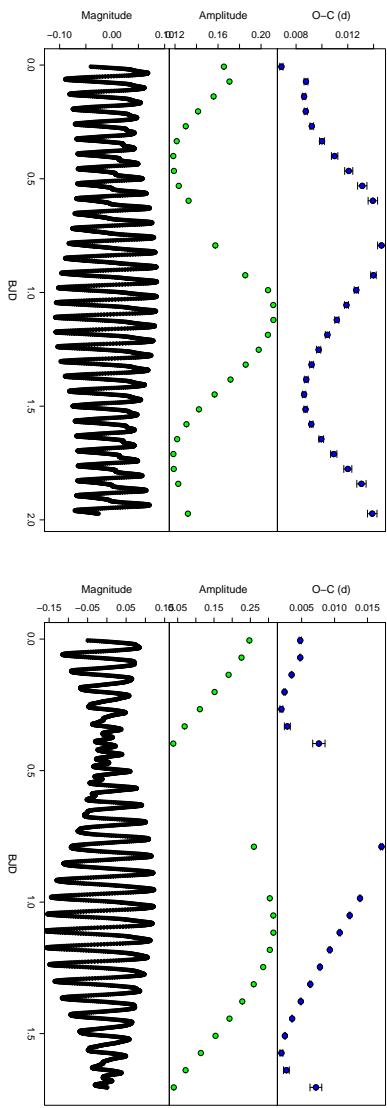


Figure 51: negative superhump と positive superhump の重ね合わせの数字実験。  
positive superhump の振幅を 0.15 等で固定し、順に negative superhump の振幅を  
0.05 等、0.15 等、0.25 等と変更したものの。各パネルは  $O-C$  カーブと振幅、光度曲  
線からなる。

長いものへと変化している様子が伺える。また、この遷移する段階ではほぼ位相のずれがなくつながっており、振幅が非常に小さくなっていることも分かる。

superoutburst 2011 S2 のデータを元に、positive superhump 周期と negative superhump 周期でそれぞれ folding して位相平均した光度曲線を Figures 48, 49 に示す。これらの位相平均光度曲線は、negative superhump は superoutburst の開始から 4 日間は等級のスケールでははっきり認めることが出来ず、その一方でそれに対応する時期は positive superhump が顕著に見られることを示す。このような negative superhump が superoutburst が進行するにつれ顕著になることは系の光度が次第に減光していることと関係があると思われる。これらの結果は positive superhump と negative superhump が共存していることを示す。positive superhump は円盤の離心変形によって引き起こされることから、superoutburst 中の ER UMa は離心変形と公転面からの傾きの両方が生じていると考えられる。

しかし、このように positive superhump と negative superhump が共存しているため、通常の SU UMa 型でしばしば行われるような positive superhump の極大時刻を見積もることで  $O-C$  カーブを求めるという手法が適用しにくい。これは、positive superhump のプロファイルに negative superhump が大きく影響しているために、positive superhump の極大時刻が negative superhump との位相関係の違いによって変動しているためである。

negative superhump の影響を除去しないで作成した  $O-C$  図と振幅の変化を Figure 50 に示す。この図から分かるように、およそ 20 サイクルごとに superhump の振幅が大きく減少するという変動が起きており、それとちょうど同時に  $O-C$  カーブが不連続に変化していることが分かる。このおよそ 20 サイクルという値は negative superhump と positive superhump の beat cycle に相当する。superhump の振幅が大きく減少するという現象は、negative superhump と positive superhump の位相がちょうど反転した状態のときに振幅が非常に小さくなることに起因する。そのため、 $O-C$  カーブの不連続な変動も positive superhump と negative superhump が重ね合わされたことによって生じるものではないかと考えられる。特に、次第に不連続の大きさが大きくなっていることから negative superhump の振幅が大きくなることによってこのような不連続は大きくなるのではないかと考えられる。

これを確かめるために、我々は negative superhump と positive superhump の重ね合わせた人工的なプロファイルを合成してこのような現象がみられるかどうか検証した。使用する光度曲線は極大時刻を求めるための negative superhump と positive superhump テンプレートの振幅を変化させることによって得た。このデータを使い、我々は positive superhump の振幅を 0.15 等と固定し、これに 0.05 等から 0.25 等まで negative superhump の振幅を変化させたものを重ね合わせて光度曲線を合成した。この合成した光度曲線について、これまで述べた方法と同じように positive superhump のテンプレートを利用して極大時刻を求めた。

Figure 51 はこのようにして得られた人工光度曲線と振幅の変動、および  $O-C$

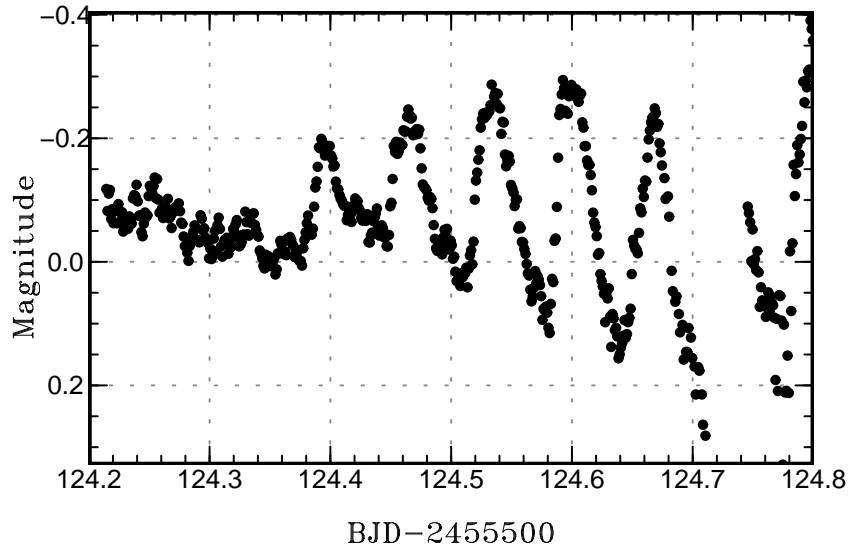


Figure 52: superoutburst 2011 S2における、Stage A superhumpに当たる部分。LOWESSによるフィッティングをしたのちに negative superhumpの信号を除去した。観測データは0.001日でbinningしてある。

図である。上から順に、negative superhumpが0.05等、0.15等、0.25等と変化させたときのものである。これによると、negative superhumpの振幅が小さいときにはsuperhumpプロファイルにはあまり大きな影響は与えないが振幅が等しいか、あるいはnegative superhumpより大きくなった場合superhumpプロファイルに大きな影響を与え、そのために極大の位置も変化してO-Cカーブに不連続な変化を生じさせる。これらの変化はいずれも、positive superhumpとnegative superhumpの位相がちょうど0.5ずれた時期に顕著に起きる。このような結果から、我々はpositive superhumpの極大時刻を見積りO-Cカーブを求めるためには、オリジナルの光度曲線からnegative superhumpの成分を差し引いた上で求めなくてはならないということを示す。

## 16.2 Negative Superhumpの影響の除去とその結果

前セクションで見たように、positive superhumpについての挙動を詳しく知るためにはnegative superhumpの影響を除去する必要がある。我々は、差し引くためのnegative superhumpのデータとしてアウトバースト直前の静穏期に観測されたnegative superhumpの平均光度曲線と各beat cycleについて作られた平均光度曲線を用いて

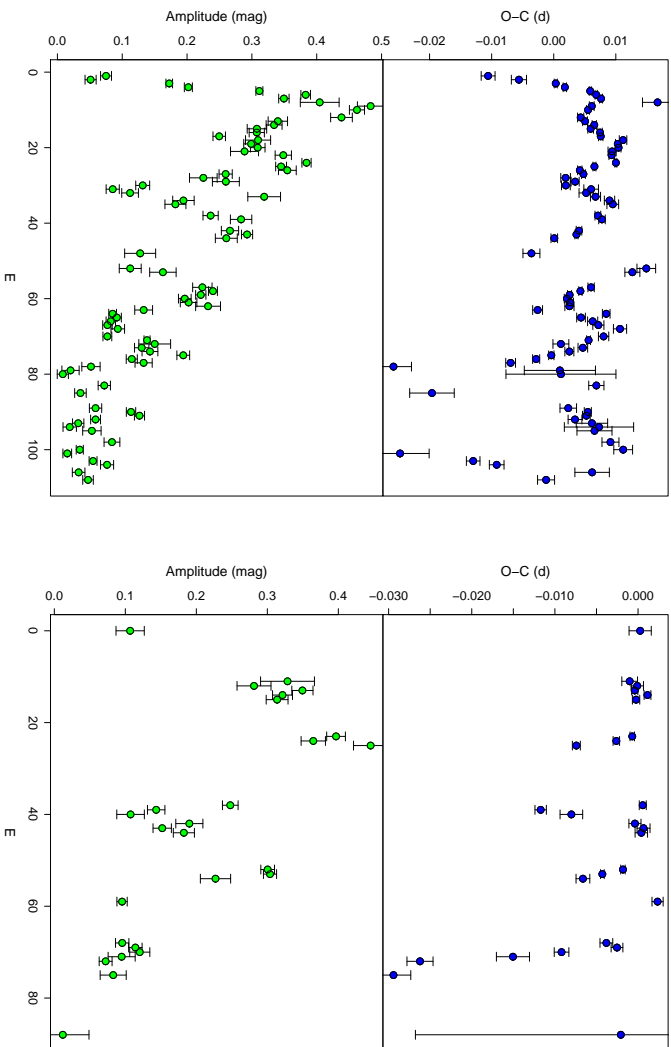


Figure 53: negative superhump の信号を除去したのちに求めた 2011 S2, S3 の  $O-C$  カーブ。2011 S2 について の予報式は  $2455624.392 + 0.065619E$ 、2011 S3 について の予報式は  $2455674.280 + 0.065619E$ 。

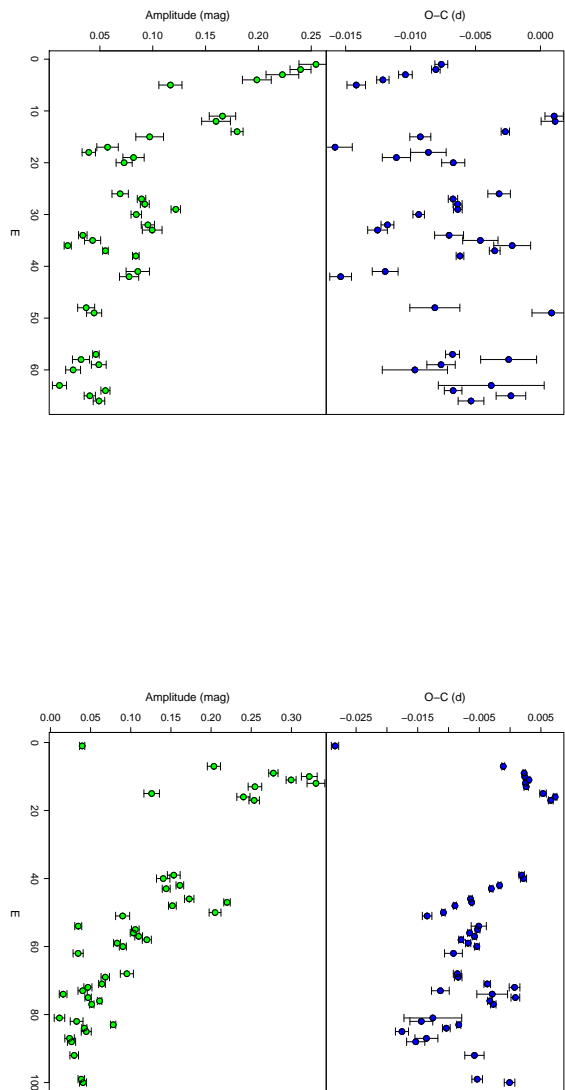


Figure 54: negative superhump の信号を除去したあとに求めた 2012 年の super-outburst (2012 S1-S3) についての  $O - C$  カーブ。2012 S1 についての予報式は  $2455924.094 + 0.065619E$  (for 2012 S1),  $2455982.403 + 0.065619E$  (for 2012 S2),  $2456034.104 + 0.065710E$  (for 2012 S3)

negative superhump の信号の差し引きを行った。

negative superhump を除去した上で、極大時刻をフィッティングによって求めた  $O-C$  カーブと positive superhump の振幅の変化をプロットしたものを Figures 53, 54 である。これらの  $O-C$  カーブに用いた極大時刻を求める方法は negative superhump の場合と同様の非線形回帰によったものであるが、今回は求める変動が positive superhump であるためテンプレートには positive superhump のものを用いた。なおこれは、Kato et al. (2009) で用いられたものと同じく、GW Lib の positive superhump の形状から作成されたものである。なお、観測された 6 つの superoutburst のうち superoutburst 2011 S1 については測光観測が行われ始めた時点ですでに negative superhump が顕著に現れるようになっていたため、 $O-C$  の見積りは行っていない。

残りの 5 つの superoutburst について得られた  $O-C$  カーブのうち、stage A superhump が存在しているとみなすことができるのは superoutburst 2011 S2, 2012 S2, 2012 S3 の 3 つである。これらの superoutburst では、アウトバーストの初期にその後比べて長い周期の superhump が現れており、かつその時期が振幅の増加している時期に一致しているからである。なお、superoutburst S3 と superoutburst 2012 S1 は superoutburst 初期の観測が欠けているため、stage A superhump の存在は確認できなかったと考えられる。Figure 53 によると、superoutburst 2011 S2 の場合  $E = 10$  までかけて positive superhump の振幅は成長し、およそ 0.25 等に達する。positive superhump の振幅が極大に達したあと、positive superhump の振幅は次第に減少していく。これは、stage B superhump に相当するものだと考えられる。しかし、特に superoutburst の中盤以降では negative superhump の影響を完全に除去するのは困難である。これは一つには減光に伴い negative superhump の振幅が大きくなったためとも考えられるが、それとは別に ER UMa の superhump のプロファイルが単純に negative superhump と positive superhump の重ね合わせではないという可能性も示唆している。このような傾向は他の 2 つの superoutburst でも同様に認められる。

このようにして stage A superhump の存在が確認できたため、この時期のデータを用いて stage A の superhump 周期を求めた。周期を求めるための方法としては PDM 法を用いた。これらの数値を求めることで、 $q$  を見積もることができるため非常に重要である。なお、Kato and Osaki (2013b) は stage A superhump を ER UMa 型矮新星で検出するのが難しい理由として ER UMa 型では静穏時まで含めて positive superhump が引き起こされており、通常の SU UMa 型矮新星の場合とことなり normal outburst によって superoutburst が引き起こされないという点をあげていた。このような場合、pressure effect は superoutburst の開始時点ですでに強く現れているために stage A superhump の存在は期待できない。しかし、我々の観測では stage A superhump が観測されている。これは、少なくとも我々の観測していた期間では通常の SU UMa 型矮新星と同様に positive superhump は生じていなかった

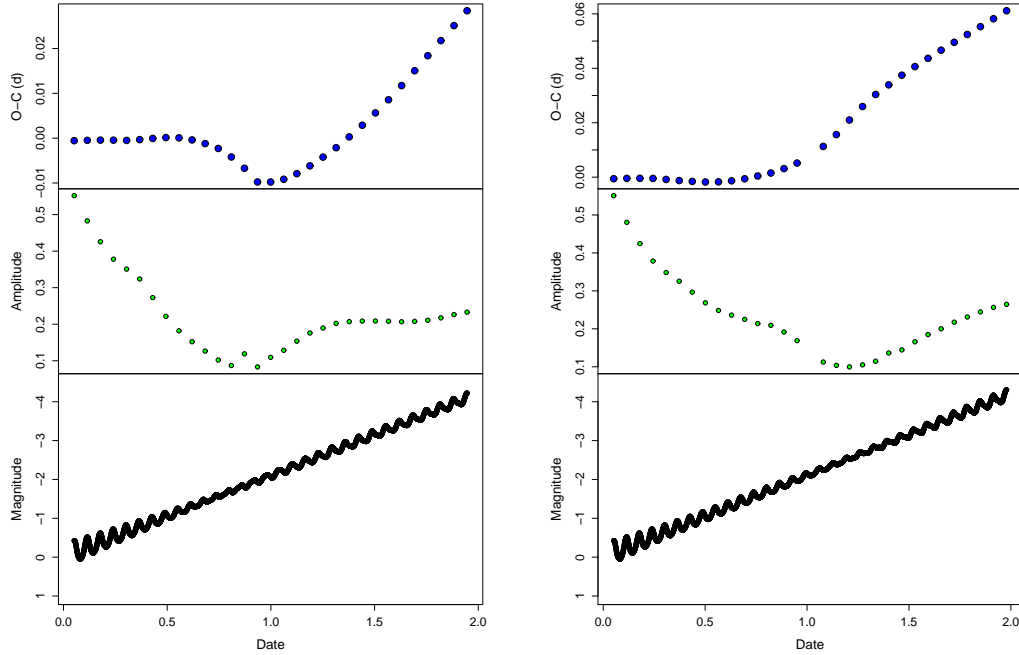


Figure 55: negative superhump と positive superhump の重ね合わせの数値実験結果。左の図は positive superhump が negative superhump と同位相から発生したと考えたもので、右の図は逆位相から成長したと解釈するもの。

ことによると思われる。

superoutburst 2011 S2 で得られたデータについて、我々は stage A superhump として 0.06604(9) 日の周期を得た。また、superoutburst 2012 S2 では 0.06570(2) 日、superoutburst 2012 S3 については 0.06624(4) 日を得た。これらの周期から、Kato and Osaki (2013b) で示されている手法を用いて  $q$  を見積もったところ、superoutburst 2011 S2 については 0.100、2012 S2 については 0.088、2012 S3 については 0.114 を得た。なお、superoutburst ごとに得られた stage A superhump 周期の間に誤差項以上の違いが認められるが、これは stage A のうち最終段階は本来純粋な stage A superhump として扱うには不適切であるが、そこが含まれているかいないかが明確でないためである。ここでは 3 つの得られた  $q$  から、 $q=0.100(15)$  と見積もる。

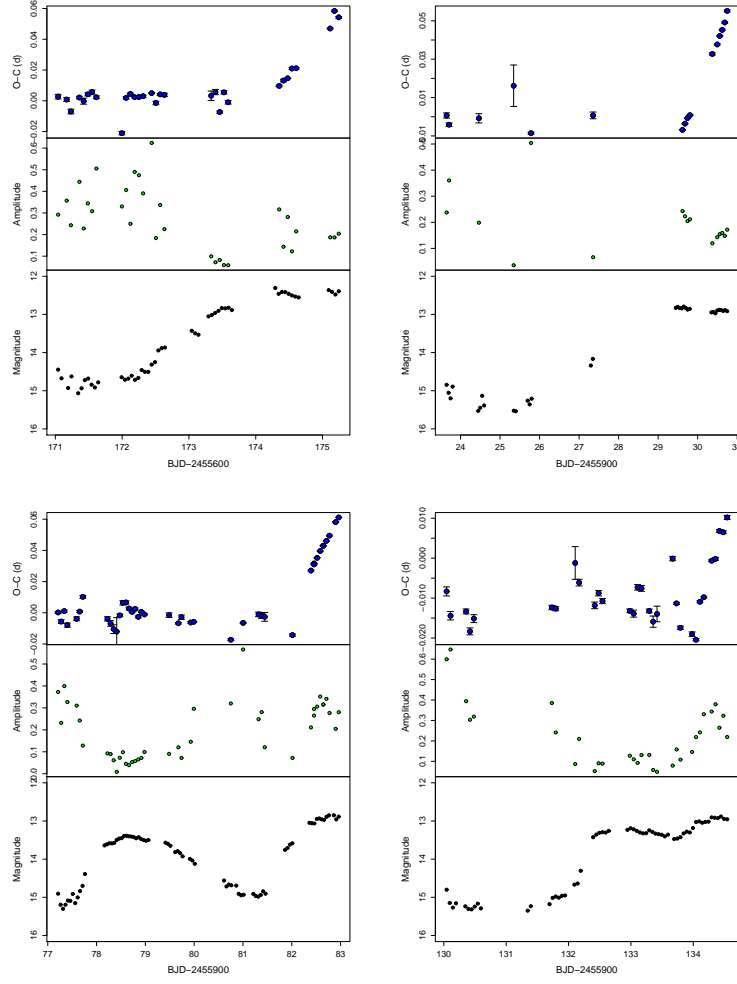


Figure 56: それぞれのパネルについて、superoutburst の立ち上がり 気について上から順に  $O - C$  カーブ、振幅、光度曲線を示す。左上が 2011 S3 についての図で、 $O - C$  を求める予報式は  $2455671.039 + 0.0622E$  である。右上が 2012 S1 についての図で、 $O - C$  予報式は  $2455923.646 + 0.0622E$  である。左下の図は 2012 S2 についての図で、 $O - C$  予報式は  $2456077.211 + 0.0622E$  である。右下の図は 2012 S3 についての図で、予報式は  $2456077.211 + 0.0622E$  である。



### 16.3 Negative Superhump から Positive Superhump への遷移

前述のとおり、negative superhump と positive superhump はその遷移段階において位相がずれることなくほぼ連続的につながっているように見える。このことは、positive superhump と negative superhump の光源の位相が同じ部分であることを示唆している。このような傾向は、superoutburst 2011 S2 だけでなく他の superoutburst の立ち上がりでも同様にして見られる (Figure 56)。negative superhump は accretion spot を光源として持つ一方で positive superhump はそれとは無関係というのが従来の考えであることから、もし光源が同じならば潮汐不安定性が accretion spot 付近で発達するという可能性がある。

しかし、上で述べたように、negative superhump と positive superhump が共存している状態では、重なり合わせによって極大時刻が大きくずれることも考えられる。そこで、以下の数値実験では negative superhump が卓越している系で系の明るさが増光し、そこに positive superhump が発達してくるという状態を考えたときに位相のずれと振幅がどのように変化するかを数値実験によって確かめた。

この数値実験では、negative superhump の振幅は静穏時 アウトバースト時を問わず flux 単位で一定光度を保つものであると仮定し、その振幅は静穏時で 0.7 等級であるものとした。また、superoutburst への立ち上がりは 2.1 等級/日であるものとした。このような仮定の下で、positive superhump は増光開始から negative superhump 4 周期分経過したところから成長をはじめ、0.15 等級/日の速度で成長するという形で重ね合わせられる。なお、数値実験を行う範囲は 2 日間とした。このとき、上の positive superhump が成長し始めるときの位相が negative superhump の位相と一致している場合、半位相ずれた位置から成長したとする場合、どのように光度曲線と  $O-C$  カーブが変化するかを比べたものが Figure 56 である。 $O-C$  カーブに用いた極大時刻の測定は negative superhump や positive superhump の場合と同じく非線形回帰によるフィッティングで行ったが、テンプレートはいずれも positive superhump のものを用いた。

これらの図は、positive superhump の成長が negative superhump の位相と同位相で始まっても逆位相で始まっても negative superhump と positive superhump の遷移段階で振幅が小さくなるという現象は共通して見られることが分かる。これは、positive superhump の成長の間に位相が合わなくなる時期が存在する事自体は不可欠なためであると思われる。また、位相が反転している場合とそうではない場合での違いとして、位相が揃った状態から始めた場合には遷移する少し前の段階で  $O-C$  カーブに、小さなへこみが生じる。これはこの位置で positive superhump と negative superhump の位相逆転が存在しているためだと思われる。このような  $O-C$  カーブは立ち上がりについてのデータが得られているものにははっきり認められない (Figures 47 56) ことから、negative superhump と positive superhump の光源の位相が独立でないことを示唆している。

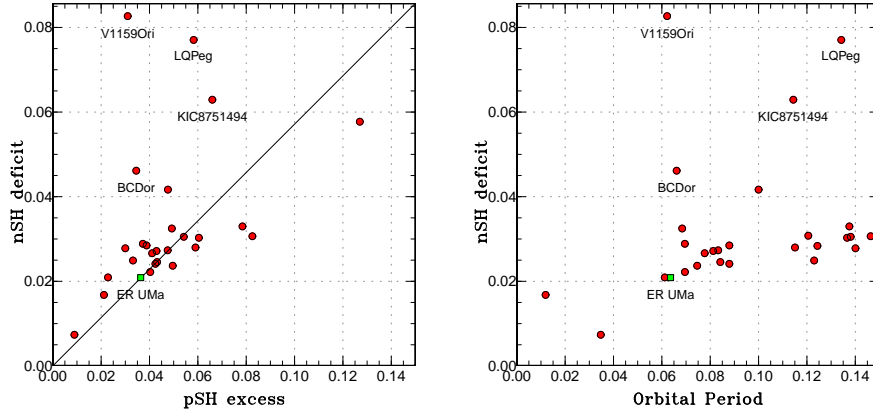


Figure 57: positive superhump と negative superhump が両方とも報告されている系についての  $\epsilon_+$   $\epsilon_-$  の関係。直線は pressure effect がないときに理論的に予想されるもの。Reference: V1159 Ori (Patterson et al., 1995), AM CVn (Skillman et al. 1999, Patterson 1998, Patterson 1999), PX And (Stanishev et al., 2002), TV Col (Retter et al., 2003), BF Ara (Kato et al. 2003, Olech et al. 2007), V1405 Aql (Chou et al. 2001 Retter et al. 2002) AH Men (Patterson, 1995), IR Gem (Fu et al., 2004), V503 Cyg (Harvey et al., 1995), TT Ari (Skillman et al. 1998, Andronov et al. 1999, Wu et al. 2002), V603 Aql (Patterson et al., 1997), RR Cha (Woudt and Warner, 2002), V344 Lyr Still et al. 2010 (Osaki and Kato, 2013b), V1504 Cyg (Osaki and Kato 2013b, Osaki and Kato 2013a), QU Aqr (Olech et al. 2009, Trampusch et al. 2005), BC Dor (Woudt et al., 2005), DW UMa (Stanishev et al. 2004, Patterson et al. 2005), V1974 Cyg (Olech, 2002), KIC 8751494 (Kato and Maehara, 2013), CSS 091121:033232+020439 (Woudt et al., 2012), KIC 7524178 (Kato and Osaki, 2013c)

## 16.4 Positive superhump と Negative superhump の関係

Figure 57 の左の図は positive superhump と negative superhump が両方観測されている系について  $\epsilon_+$  と  $|\epsilon_-|$  の関係をグラフにしたものである。理論的には、pressure effect の影響を考えない場合  $\epsilon_+$  と  $|\epsilon_-|$  について  $|\epsilon_-|/\epsilon_+ = 4/7$  の関係がある。図にしめされた天体のうちの多くはこの関係に従っており、今回我々が得た ER UMa の場合の値もこの関係を満たしている。一方、大きく関係から外れている系のうち KIC 8751494 は pressure effect による影響が大きいと考えられる Kato and Maehara (2013)。また、V1159 Ori も非常に離れたところに位置しているが、これは “impulsive superhump” であると思われる (Osaki and Kato, 2013b) <sup>5</sup>。ER UMa について、Gao

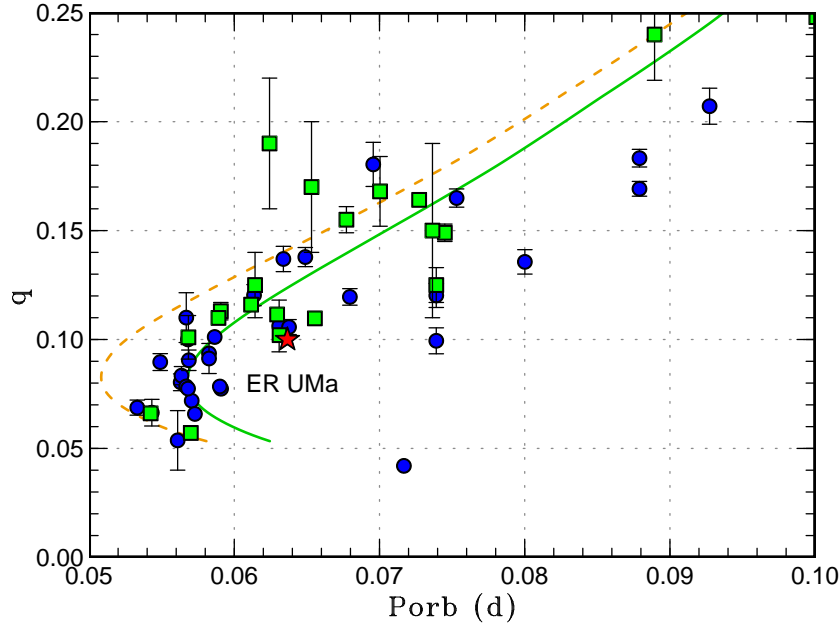


Figure 58: 質量比  $q$  と軌道周期  $P_{\text{orb}}$  の関係をプロットしたもの。これらのデータは Kato and Osaki (2013b) からとった。丸は stage A superhump の周期を用いて  $q$  が見積もられたもの、および四角は食から  $q$  が見積もられたものを示す。星印は ER UMa を示す。点線と実線はそれぞれ、標準的な連星進化理論に従っている場合と修正された連星進化理論にしたがった場合の進化トラックを示す (Knigge et al., 2011)。

et al. (1999) はより短い周期の negative superhump の存在を報告しており、これは上の  $|\epsilon_-|/\epsilon_+ = 4/7$  から大きく外れる。しかし、これも V1159 Ori の場合と同様に “impulsive superhump” として考えるべきであると考えられる。

また、Figure 57 の右の図は negative superhump の周期と negative superhump deficit  $|\epsilon^*|$  の関係を示す。

## 17 連星進化の観点からの考察

stage A superhump から見積もられた ER UMa の質量比  $q$  は 0.100(15) である。この値は Knigge et al. (2011) で示されている矮新星の標準的な連星進化のトラックに

<sup>0</sup>この現象は、Wood et al. (2011) でも提唱されている。

よく一致している。Hellier (2001) は ER UMa 型矮新星に高頻度のアウトバーストが見られるのは非常に  $q$  が小さい系であるためではないかという可能性を示唆した。しかし、確かに outburst の頻度から伺えるように ER UMa は同じ軌道周期の他の矮新星に比べると非常に大きい質量移動率を持っているが、これは進化段階が他の矮新星を大きく違うためではないということを示唆する。

## 18 結論

SU UMa 型矮新星の一つ ER UMa の 2011 年 1 月の superoutburst 中に周期 0.0622 日の negative superhump が存在することを発見した。その後、2011–2012 年の 2 年間にわたって世界的な観測キャンペーンを行い、全部で 307 夜の測光観測データを得た。この観測から、2 年間を通じて静穏時とアウトバースト時を問わず negative superhump が観測された。これらの観測データを解析することによって、以下の結論を得た。

(1) 2011 年と 2012 年の supercycle 各 3 回について、周期変化を論ずるだけの観測データを得ることが出来た。これらの観測データを元に、 $O-C$  解析、PDM 解析、及び Lasso を用いた二次元周期解析を行い、negative superhump の周期が supercycle 中にどのように変化するかを追跡した。その結果、supercycle の間を通じて、全体的には negative superhump の周期は減少しており、それに重なって静穏時には周期の増加が見られた。また、superoutburst が終了すると再び negative superhump は前回の supercycle の初期と近い値まで増加していた。このような変化は円盤の半径の変化を反映しており、superoutburst の終了時がもっとも小さく、そこから次の superoutburst が始まるまで次第に増加していくことを示している。このような半径の変化は、この系において円盤が tilt しており、かつ現在唱えられている SU UMa 型矮新星のアウトバーストに関するモデルのうちで潮汐不安定性モデルが正しいとするとうまく説明することができるものである。

(2) 2 年間の観測キャンペーンを通じて、1 つの supercycle の間にほぼ 4 回の normal outburst が見られた。これは negative superhump が観測されない時期の normal outburst の頻度に比べると小さい。このような傾向は、Zemko et al. (2013) が過去のライトカーブから見出した傾向や V1504 Cyg で Osaki and Kato (2013a) が見出した傾向に一致する。このような normal outburst の頻度の低下は、円盤が傾いていることにより円盤の物質がより内側にたまる傾向があり、円盤の外縁部での熱的不安定性が引き起こされにくくなっていることと関連があると思われる。これは同様に、normal outburst の増光スピードが supercycle の後半になるにつれ落ち、円盤のより内側で熱的不安定性が引き起こされていることから裏付けられる。

(3) negative superhump と positive superhump は共存しており、superoutburst が開始した初期は positive superhump が卓越しているが数日後から negative super-

humpの影響が大きくなる。このうち、増光初期の光度曲線から negative superhumpの影響を差し引くことによって、stage A superhumpを見出した。superoutburstが進むに連れ negative superhumpを差し引くことが難しくなることから、superoutburst中のプロファイルは positive superhumpと negative superhumpの単純な重ね合わせとしてみるのとは不十分である可能性があると考えられる。

(4)ここで得た stage A superhumpは、SU UMa型矮新星のうち ER UMa型のサブタイプに属する天体の中で検出されたのは初めてである。この stage A superhumpを用いて、ER UMaの質量比  $q$ を見積もることを試みた結果、0.100(15)を得た。この見積もられた  $q$ は、ER UMaの軌道周期を考えると非常に典型的なものであり、この天体が非常に多くの増光を示すなど他のSU UMa型とはきわだった特徴を持っているにもかかわらず、進化的な観点からは標準的な進化トラックをたどった天体であることを示唆する。

## 19 謝辞

まず、指導教員である加藤太一助教に対し、深く感謝します。本研究を遂行するにあたって、大学院在籍期間を通じて担当指導教員として研究に関するさまざまな面から丁寧かつ的確な指導、および議論を通じての有用な知見を頂きました。また、加藤氏の開発した統計解析的手法なしには、この研究は定性的なものに止まらざるを得なかったでしょう。同様に、野上大作助教からも、激変星を研究するうえでの必要な知識や考え方など、さまざまなことを教えていただきました。またクリミア天文台の E. Pavlenko 氏からは、第一論文を改訂する際にあたって助言をいただき、その後も、論文執筆などの際に多大なる助けをいただきました。また、その他のすべての教室スタッフ及び院生の方々には宇宙物理学教室における研究活動を支えてくださり、ときには天文と関係ない話題まで含めさまざまな議論に加わって頂きました。合わせて感謝申し上げます。

尾崎洋二東京大学名誉教授、植村誠広島大学准教授、松本桂大阪教育大学准教授、田邊健慈岡山理科大学教授、今田明国立天文台研究員、前原裕之木曾観測所研究員の方々からは、学会やワークショップ、メーリングリストなどを通じてさまざまな助言やアイデアを頂きました。巻末の圧縮センシングについての概要を書くにあたっては、植村氏による圧縮センシングに関するレジュメを大いに参考にさせていただきました。また、松本氏、前原氏からは当研究のターゲットである ER UMaの観測も頂きました。合わせて感謝致します。

また、岡山理科大学の今村和義氏、大阪教育大学の中川辰一氏をはじめ、VSNETの呼びかけを通じて観測をしていただいた方々に深く感謝申し上げます。私の観測キャンペーンの呼びかけに快く応えてくださったこれらの方々の熱心な観測なしには、当研究は決して完成されなかったでしょう。特に、スペインの Enrique de Miguel 氏

は 2011 年 1 月の superoutburst の報を受けて最初に観測を行い negative superhump に相当する周期を検出し、当研究のきっかけをあたえてくれました。

最後になりましたが、長い間にわたって私の研究活動を支えてくださった私の家族、特に私が光学機器に強い興味を持つきっかけとなった祖父、木村則明に心より感謝申し上げます。

## A 観測リスト

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
81.4612	81.7636	382	deM	C	60s
83.0675	83.3887	410	Aka	C	60s
83.9591	84.0043	100	Kra	C	30s
84.0048	84.0497	99	Kra	C	30s
84.0048	84.3783	888	Ioh	C	15s
84.6368	84.7775	306	Kra	C	30s
85.6340	86.0532	917	Kra	C	30s
86.0664	86.3767	421	Aka	C	60s
87.1712	87.3828	293	Aka	C	60s
87.7992	88.0526	549	Kra	C	30s
88.0493	88.3827	434	Aka	C	60s
88.7965	89.0512	401	Kra	C	50s
89.0715	89.3325	338	Aka	C	60s
89.7937	90.0516	406	Kra	C	50s
90.0890	90.3768	341	Aka	C	60s
90.1906	90.2003	15	Ioh	C	15s
90.2019	90.3130	437	KU	C	15s
90.4132	90.7707	447	deM	C	60s
90.7909	91.0508	409	Kra	C	50s
90.9506	91.3721	1011	Ioh	C	15s
91.0508	91.3786	441	Aka	C	60s 45s
91.1379	91.3305	111	OUS	C	60s
91.1400	91.3355	161	OUS	C	30s
91.1908	91.3808	808	KU	C	15s
91.5065	91.6415	232	Ter	C	45s
91.5456	91.7274	226	deM	C	60s
91.7882	92.0505	413	Kra	C	50s
92.0075	92.3762	823	Ioh	C	15s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
92.0661	92.3867	554	Aka	C	60s
92.5366	92.7694	287	deM	C	60s
92.9491	93.3727	1030	Ioh	C	15s
93.3783	93.4599	208	VIR	C	30s
93.5361	93.7695	296	deM	C	60s
93.9749	94.3798	520	Aka	C	60s
94.0172	94.3707	893	Ioh	C	15s
94.1159	94.2477	360	OKU	Rc	30s
94.5085	94.7697	329	deM	C	60s
95.0433	95.3570	404	Aka	C	60s
95.1841	95.3707	477	Ioh	C	15s
95.2823	95.3603	120	Mhh	Ic	50s
95.2828	95.3606	99	Mhh	V	60s
95.5754	95.7112	161	IMi	C	60s
95.9480	96.3715	1000	Ioh	C	15s
95.9731	96.2966	444	OUS	C	60s
96.0769	96.3735	353	Aka	C	60s
96.3357	96.7662	551	deM	C	60s
96.7249	96.8251	125	SWI	C	60s
97.0216	97.3172	711	Ioh	C	15s
97.3349	97.5277	248	deM	C	60s
97.4345	97.7262	849	Rui	C	60s/15s
97.9645	98.2434	588	Ioh	C	15s
98.0075	98.3787	454	Aka	C	60s
98.0662	98.2102	197	Mhh	Ic	60s
98.1520	98.3217	129	OKU	V	30s
98.3438	98.7638	513	deM	C	40s/60s
98.3771	98.3876	16	Kai	C	30s
98.7125	98.9376	277	SWI	C	60s
99.0687	99.2541	214	Aka	C	60s
99.1766	99.3704	501	Ioh	C	15s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.



Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
99.3583	99.7604	661	deM	C	40s
100.0162	100.1296	166	Ioh	C	15s
100.0320	100.3259	357	Aka	C	60s
100.2493	100.3382	209	OKU	Rc	30s
100.3676	100.4750	129	deM	C	60s
100.5620	101.0463	848	Kra	C	40s
101.2780	101.6386	414	Ter	C	60s
101.2909	101.6901	259	Ham	C	120s
101.5025	101.6849	157	deM	C	60s
101.9803	102.1047	299	Siz	C	20s
102.0555	102.1884	335	Ioh	C	15s
102.0806	102.3758	282	Aka	C	60s
102.5646	103.0406	794	Kra	C	40s
103.3178	103.4895	178	deM	C	60s
103.6117	104.0452	726	Kra	C	40s
104.3228	104.5033	228	deM	C	60s
104.5656	105.0448	830	Kra	C	40s
104.5751	104.7502	236	deM	C	60s
104.6818	104.8553	230	SWI	C	60s
105.0303	105.3237	738	Ioh	C	15s
105.0545	105.3793	444	Aka	C	60s
105.0618	105.3481	750	Siz	C	20s
105.6684	105.8555	248	SWI	C	60s
105.6728	105.9557	128	Tze	C	180s
105.7499	106.0439	460	Kra	C	50s
105.8879	106.1951	774	Siz	C	20s
105.9091	106.1330	500	Ioh	C	15s
106.0105	106.1135	140	Mhh	Ic	50s
106.0108	106.1138	140	Mhh	V	50s
106.4233	106.7516	585	deM	C	40s
106.7472	106.9127	209	Kra	C	60s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
107.2270	107.3805	195	CRI	C	60s
107.6803	107.8480	220	SWI	C	60s
107.7444	107.8746	206	Kra	C	40s
107.8836	108.1970	841	Siz	C	20s
107.9666	108.3491	417	Aka	C	60s
108.0046	108.1782	442	Ioh	C	15s
108.3286	108.5021	217	deM	C	60s
108.6656	108.8346	222	SWI	C	60s
108.7416	108.8744	210	Kra	C	50s
108.9068	109.1166	194	OKU	C	30s
109.2959	109.5950	129	Ham	C	120s
109.6384	109.8408	263	SWI	C	60s
109.7389	109.8747	182	Kra	C	60s
110.3096	110.4380	161	deM	C	60s
110.9516	111.3784	576	Aka	C	60s
111.1731	111.3261	383	Ioh	C	15s
111.6402	111.8384	259	SWI	C	60s
112.6350	112.8428	271	SWI	C	60s
112.9592	113.3599	383	Aka	C	60s
113.3073	113.7121	624	deM	C	60s
113.8963	114.2047	804	Siz	C	20s
113.9407	114.3703	581	Aka	C	60s
114.0164	114.3544	883	Ioh	C	15s
114.3531	114.7079	231	Ham	C	120s
114.3563	114.7528	434	deM	C	60s
114.5701	114.8325	412	Kra	C	50s
114.6531	114.8419	250	SWI	C	60s
114.9430	115.3067	368	Aka	C	60s
115.0414	115.2215	504	OKU	C	30s
115.1288	115.3592	464	Ioh	C	15s
115.3055	115.7433	449	deM	C	60s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
115.4450	115.6201	113	Ham	C	120s
115.6005	115.8361	312	SWI	C	60s
115.7667	115.9162	233	Kra	C	50s
116.0311	116.3476	307	Aka	C	60s
116.1918	116.5826	171	CRI	C	180s
116.3069	116.7393	430	deM	C	60s
116.3363	116.4372	166	Vir	C	40s
116.6067	116.8355	303	SWI	C	60s
116.8205	116.9164	142	Kra	C	50s
117.1067	117.2920	497	Ioh	C	15s
117.3084	117.7357	438	deM	C	60s
117.6185	117.6844	46	BBo	C	120s
117.6828	117.9781	371	SWI	C	60s
117.7611	117.9160	243	Kra	C	50s
118.0090	118.3736	491	Aka	C	60s
118.0174	118.3152	721	Ioh	C	15s
118.2117	118.3394	68	CRI	C	150s
118.3091	118.7359	438	deM	C	60s
118.6750	118.9915	402	SWI	C	60s
118.9255	119.0919	404	Ioh	C	15s
119.3099	119.6462	299	deM	C	60s
119.6145	119.6816	46	BBo	C	120s
120.2034	120.3633	581	KU	C	15s
120.3107	120.7317	394	deM	C	60s
120.6472	120.9834	430	SWI	C	60s
121.3146	121.7299	530	deM	C	60s
121.5807	121.6735	60	BBo	C	120s
121.5997	121.8141	283	SWI	C	60s
121.7500	121.9161	257	Kra	C	50s
122.5434	122.6705	179	DPV	V	30s
122.6069	122.7674	100	BBo	C	120s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
122.7472	122.9159	267	Kra	C	50s
122.7740	122.9897	280	SWI	C	60s
122.9399	123.3472	485	Aka	C	60s
123.3837	123.5611	118	CRI	C	120s
123.3886	123.4930	137	DPV	V	30s
123.5855	123.8297	147	BBo	C	120s
123.6400	123.8103	225	SWI	C	60s
123.7444	123.9162	269	Kra	C	50s
123.9091	123.9275	21	Sac	C	60s
123.9348	124.3598	436	Aka	C	60s
124.0499	124.1438	138	Mhh	Ic	50s
124.0502	124.1441	137	Mhh	V	50s
124.0954	124.1545	171	KU	C	15s
124.2111	124.3360	182	OUS	C	50s
124.2148	124.6109	937	CRI	C	30s
124.2581	124.6708	1101	DPV	C	30s
124.3066	124.4592	362	Kai	C	30s
124.3613	124.7064	224	Ham	C	120s
124.7416	124.9162	277	Kra	C	50s
124.9840	125.1650	290	OUS	C	50s
124.9999	125.3501	936	Ioh	C	15s
125.0662	125.3525	396	Aka	C	60s
125.1928	125.4915	709	CRI	C	30s
125.2698	125.5950	210	Ham	C	120s
125.2941	125.3311	96	Kai	C	30s
125.5703	125.6805	70	BBo	C	120s
125.7389	125.8501	176	Kra	C	50s
125.7667	125.9886	288	SWI	C	60s
125.9322	126.2387	496	Aka	C	60s
125.9501	126.3087	735	Ioh	C	15s
125.9525	126.3509	1036	Siz	C	30s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
126.0425	126.1294	140	Mhh	Ic	45s
126.0428	126.1297	140	Mhh	V	45s
126.3339	126.5086	135	Shu	V	20s
126.3343	126.5091	133	Shu	R	20s
126.3351	126.4722	101	Shu	B	20s
126.3568	126.5146	101	Ham	C	120s
126.3832	126.4438	81	CRI	C	60s
126.6707	126.7842	70	BBo	C	120s
126.9105	127.1181	504	Ioh	C	15s
127.2797	127.7019	274	Ham	C	120s
127.3103	127.7107	531	deM	C	40s/60s
127.9194	128.3468	768	Aka	C	60s
128.2648	128.6815	207	Shu	B	160s
128.2652	128.6821	213	Shu	V	160s
128.2656	128.6825	269	Shu	R	120s
128.2683	128.4314	39	Shu	U	180s
128.2702	128.6578	1009	DPV	C	30s
128.2863	128.6989	268	Ham	C	120s
128.2870	128.4372	365	Kai	C	30s
128.4057	128.4337	10	Shu	I	180s
128.7641	128.9829	284	SWI	C	60s
128.9004	129.2091	800	Siz	C	30s
128.9373	129.3308	656	Aka	C	60s
129.0103	129.1282	189	Mhh	Ic	45s
129.0106	129.1285	189	Mhh	V	45s
129.0571	129.3483	778	Ioh	C	15s
129.2803	129.5875	197	Ham	C	120s
129.6139	129.9844	475	SWI	C	60s
129.7005	129.8405	90	BBo	C	120s
129.7285	129.9161	293	Kra	C	50s
129.9553	130.3319	513	Aka	C	60s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
130.0086	130.3436	842	Ioh	C	15s
130.0463	130.1540	291	Siz	C	30s
130.2247	130.4445	144	Shu	B	20s
130.2252	130.4418	139	Shu	V	20s
130.2256	130.4513	69	Shu	R	40s
130.3610	130.4372	14	Shu	U	90s
130.5846	130.7521	99	BBo	C	120s
130.7257	130.9158	301	Kra	C	50s
130.7466	130.9762	298	SWI	C	60s
130.9167	131.0890	204	Aka	C	60s
131.0232	131.2186	455	Siz	C	30s
131.1061	131.3436	617	Ioh	C	15s
131.6867	131.9162	360	Kra	C	50s
132.0153	132.2564	998	OKU	C	15s
132.0286	132.3419	823	Ioh	C	15s
132.1041	132.3238	304	Aka	C	60s
132.3389	132.3956	34	SAO	V	120s
132.3389	132.6486	104	Shu	V	60s
132.4762	132.5614	41	Shu	U	60s
132.4778	132.6518	73	Shu	R	60s
132.5630	132.6349	55	Shu	B	60s
132.6500	132.6512	2	Shu	I	60s
132.7368	132.9163	285	Kra	C	50s
132.9279	133.1359	279	Aka	C	60s
133.1202	133.2554	280	OKU	C	30s
133.2700	133.6167	312	CRI	C	90s
133.9088	134.3309	1062	Ioh	C	15s
133.9245	134.2841	492	Aka	C	60s
134.1900	134.4818	248	CRI	C	90s
134.2789	134.3441	39	SAO	V	60s
134.2789	134.3441	39	Shu	V	60s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
134.4224	134.5509	794	Ter	C	10s
134.7312	134.8743	226	Kra	C	50s
134.7416	134.9449	262	SWI	C	60s
135.1712	135.5455	1348	CRI	C	15s
135.2032	135.6222	371	Ter	C	90s
135.2039	135.3027	268	Ioh	C	15s
135.2756	135.4712	469	Kai	C	30s
135.4246	135.5254	322	VIR	C	20s
136.1744	136.5891	1583	Ter	C	30s
136.1880	136.5348	294	CRI	C	90s
136.2261	136.3512	171	Aka	C	60s
136.2817	136.6931	267	Ham	C	120s
136.3263	136.4211	303	VIR	C	20s
136.3305	136.4522	295	deM	C	30s
136.9200	137.3281	528	Aka	C	60s
137.0363	137.3222	748	Ioh	C	15s
137.1971	137.4967	95	CRI	C	30s
137.3264	137.4226	244	VIR	C	30s
137.4029	137.6006	334	deM	C	40s
137.7229	137.8747	240	Kra	C	50s
137.7254	137.8994	226	SWI	C	60s
137.9264	138.3264	960	Siz	C	30s
137.9326	138.3355	1056	Ioh	C	15s
137.9491	138.1159	211	OUS	C	60s
138.0873	138.3314	333	Aka	C	60s
138.1119	138.2418	204	OKU	C	30s
138.3358	138.4769	181	deM	C	40s
138.7122	138.9233	274	SWI	C	60s
138.7201	138.8744	242	Kra	C	50s
139.4819	139.6697	220	deM	C	40s
139.9114	140.2276	836	Siz	C	30s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
139.9292	140.1715	264	Aka	C	60s
140.0031	140.2083	488	Ioh	C	15s
140.3493	140.6668	304	deM	C	40s/60s
140.7078	140.9175	272	SWI	C	60s
140.7145	140.8744	251	Kra	C	50s
141.0274	141.2366	481	Ioh	C	15s
141.1954	141.5325	209	CRI	C	120s
141.3484	141.6251	320	deM	C	60s
141.4013	141.5861	55	Shu	R	90s
141.4029	141.5821	39	Shu	V	90s
141.4048	141.5810	37	Shu	B	90s
141.4842	141.4867	2	Shu	I	20s
141.4951	141.5846	15	Shu	U	90s
142.2938	142.6185	212	Ham	C	120s
142.3131	142.5250	80	Shu	WF	90s
142.3206	142.5851	46	Shu	B	90s
142.3220	142.6063	49	Shu	V	90s
142.3230	142.6080	48	Shu	R	90s
142.9223	143.3345	488	Aka	C	60s
142.9728	143.2752	366	OUS	C	60s
143.2329	143.2755	13	Shu	R	90s
143.2344	143.2711	12	Shu	V	90s
143.2667	143.2745	2	Shu	B	90s
143.2798	143.4127	88	CRI	C	120s
143.2931	143.6647	242	Ham	C	120s
143.4544	143.6456	348	deM	C	60s
143.7062	143.8741	264	Kra	C	50s
143.9605	144.0718	151	Mhh	Ic	60s
143.9608	144.0721	151	Mhh	V	60s
143.9658	144.2904	403	Aka	C	60s
144.0835	144.2111	331	Siz	C	30s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。“C” は clear を示す.



Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
144.2552	144.6427	875	DPV	C	30s
144.2733	144.5137	72	Shu	R	90s
144.2936	144.6646	242	Ham	C	120s
144.3105	144.4844	44	Shu	V	90s
144.3118	144.4858	45	Shu	B	90s
144.4802	144.6598	350	deM	C	40s
144.7042	144.8743	267	Kra	C	50s
144.9214	145.2836	483	Aka	C	60s
144.9913	145.2504	693	Ioh	C	15s
145.0909	145.2778	254	OUS	C	60s
145.2830	145.5176	99	Shu	R	90s
145.2844	145.5144	67	Shu	V	90s
145.2855	145.4412	30	Shu	U	90s
145.2881	145.5136	65	Shu	B	90s
145.2924	145.4432	7	Shu	I	90s
145.3090	145.6646	229	Ham	C	120s
145.5867	145.9360	649	Kra	C	40s
146.1105	146.2795	121	OUS	C	60s
146.2122	146.6082	273	CRI	C	120s
146.6644	146.9002	308	SWI	C	60s
146.7105	146.8745	254	Kra	C	50s
146.9158	147.2935	455	Aka	C	60s
146.9547	147.2923	897	Ioh	C	15s
147.0929	147.2741	241	OUS	C	60s
147.2127	147.4845	374	CRI	C	60s
147.3700	147.5056	488	Ter	C	15s
147.5863	147.8116	350	Kra	C	50s
147.6696	147.9005	302	SWI	C	60s
147.9645	148.1953	264	Ioh	C	15s
148.0463	148.3163	367	Aka	C	60s
148.3025	148.4106	70	Ham	C	120s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
148.3062	148.4736	58	Shu	R	90s
148.3130	148.4724	42	Shu	V	90s
148.3144	148.4341	27	Shu	B	90s
148.3566	148.4379	221	DPV	CR	30s
148.5862	148.8121	355	Kra	C	50s
148.6593	148.9061	316	SWI	C	60s
148.9362	149.1895	342	Aka	C	60s
149.0315	149.1995	667	KU	C	15s
149.1008	149.3003	535	Ioh	C	15s
149.2200	149.5110	130	CRI	C	180s
149.2986	149.6230	209	Ham	C	120s
149.3193	149.4617	217	deM	C	60s
149.3365	149.6012	433	VIR	C	45s
149.5876	149.7499	255	Kra	C	50s
150.2488	150.3154	16	CRI	C	180s
150.2634	150.6256	959	DPV	C	30s
150.2647	150.3412	33	Shu	R	90s
150.2657	150.3402	15	Shu	V	90s
150.2733	150.3424	15	Shu	B	90s
150.2973	150.6230	211	Ham	C	120s
150.5371	150.6447	128	deM	C	60s
150.6679	150.7775	143	SWI	C	60s
150.9174	151.2824	485	Aka	C	60s
151.0805	151.2645	253	OUS	C	60s
151.1086	151.2223	453	KU	C	15s
151.3637	151.5775	93	Shu	R	90s
151.3657	151.5782	49	Shu	V	90s
151.3667	151.5792	50	Shu	B	90s
151.3750	151.5476	32	Shu	U	90s
151.4174	151.6269	534	DPV	C	30s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
151.4285	151.6036	288	VIR	C	45s
151.5277	151.6413	141	deM	C	60s
151.9442	152.2237	347	Aka	C	60s
151.9501	152.2974	934	Ioh	C	15s
152.0069	152.1995	882	KU	C	15s
152.0836	152.2618	246	OUS	C	60s
152.2624	152.3915	35	Shu	R	90s
152.2634	152.3921	29	Shu	V	90s
152.2656	152.3907	25	Shu	B	90s
152.2728	152.3892	26	Shu	U	90s
152.3846	152.5000	270	DPV	C	30s
152.5003	152.5949	224	DPV	C	30s
152.5377	152.6399	125	deM	C	60s
152.5889	152.7499	253	Kra	C	50s
152.6772	152.9022	292	SWI	C	60s
152.9345	153.2607	442	Aka	C	60s
153.0965	153.2585	428	Ioh	C	15s
153.1051	153.2036	306	KU	C	15s
153.2177	153.4463	107	CRI	C	120s
153.5892	153.7501	250	Kra	C	50s
153.6620	153.9005	312	SWI	C	60s
153.9668	154.0239	73	Aka	C	60s
154.4154	154.6404	87	Shu	C	90s
154.5897	154.7482	249	Kra	C	50s
154.9240	155.2622	461	Aka	C	60s
155.0849	155.2164	603	KU	C	15s
155.0850	155.2605	240	OUS	C	60s
155.2590	155.6399	168	Shu	C	180s
155.2774	155.6197	838	DPV	C	30s
155.2937	155.5186	133	CRI	C	120s
155.9372	156.2702	451	Aka	C	60s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
155.9690	156.3022	895	Ioh	C	15s
156.0398	156.2140	793	KU	C	15s
156.4494	156.6226	259	deM	C	50s
156.9365	157.2170	375	Aka	C	60s
156.9765	157.2417	721	Ioh	C	15s
156.9823	157.1990	990	KU	C	15s
157.2723	157.6329	148	Shu	Rc	90s
157.2967	157.5725	364	DPV	C	30s
157.3123	157.3429	51	VIR	C	45s
157.4044	157.4497	61	Shu	Ic	20s
157.9871	158.2296	657	Ioh	C	15s
158.0054	158.1344	274	OKU	C	30s
158.3197	158.6230	197	Ham	C	120s
158.5591	158.6887	402	Rui	C	15s
158.9997	159.1483	641	OKU	C	15s
160.2383	160.3212	55	CRI	C	120s
160.3189	160.6231	198	Ham	C	120s
161.3222	161.6231	196	Ham	C	120s
161.9494	162.2409	375	Aka	C	60s
162.3239	162.6230	192	Ham	C	120s
162.5021	162.6128	54	Shu	Rc	90s
162.9359	163.2250	375	Aka	C	60s
163.9436	164.2228	599	OKU	C	30s
163.9660	164.2264	351	Aka	C	60s
163.9750	164.2913	853	Ioh	C	15s
164.3312	164.6231	186	Ham	C	120s
164.9329	164.9825	131	Ioh	C	15s
165.0162	165.2082	743	KU	C	15s
165.0416	165.1812	300	OKU	C	30s
165.0940	165.2227	174	OUS	C	60s
165.1022	165.2505	206	Aka	C	60s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
165.2558	165.3583	35	Shu	R	90s
165.2660	165.3550	32	Shu	V	90s
165.3063	165.5346	288	DPV	C	60s
165.3159	165.3567	13	Shu	B	90s
165.3512	165.5214	108	Shu	C	90s
165.3512	165.5214	108	Shu	Rc	90s
165.9782	166.0934	175	Ioh	C	15s
166.0009	166.0775	105	Aka	C	60s
167.3479	167.5160	110	Ham	C	120s
167.4106	167.4995	310	Rui	C	15s
168.0178	168.2906	377	Aka	C	60s
168.0300	168.2075	238	OUS	C	60s
168.2850	168.6185	171	Shu	Rc	90s
168.3369	168.4207	18	Shu	R	90s
168.3381	168.4219	19	Shu	V	90s
168.3395	168.4193	17	Shu	B	90s
169.3892	169.6187	77	Shu	Rc	90s
170.4480	170.6076	72	Shu	Rc	90s
170.9865	171.2319	183	Aka	C	60s
171.3301	171.6231	192	Ham	C	120s
171.9668	172.1662	272	Aka	C	60s
172.0676	172.2049	186	OUS	C	60s
172.0909	172.2196	543	KU	C	15s
172.2245	172.3319	51	CRI	C	120s
172.2860	172.5831	404	DPV	C	30s
172.3290	172.6231	182	Ham	C	120s
172.4002	172.4486	65	IMi	C	60s
173.0345	173.1216	214	KU	C	15s
173.2521	173.4699	143	CRI	C	120s
173.2855	173.6153	237	Shu	Rc	30s
173.2861	173.3729	22	Shu	B	90s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
173.2866	173.3738	18	Shu	V	90s
173.2881	173.3752	19	Shu	U	90s
173.3691	173.5789	274	IMi	V	60s
174.2897	174.3630	98	DPV	C	30s
174.2927	174.3869	35	Shu	B	90s
174.2939	174.3852	34	Shu	U	90s
174.2951	174.5946	417	Shu	Rc	20s
174.2974	174.3864	34	Shu	V	90s
174.2978	174.3873	15	Shu	Ic	90s
175.0449	175.2423	270	Aka	C	60s
175.2126	175.2799	253	KU	C	15s
175.9957	176.2547	343	Aka	C	60s
176.0491	176.1949	565	KU	C	15s
176.0719	176.2121	371	Ioh	C	15s
176.3037	176.4764	226	CRI	C	60s
176.9412	177.1276	478	Siz	C	30s
177.0146	177.2097	564	KU	C	15s
177.3023	177.4898	248	DPV	C	30s
177.9824	178.2447	354	Aka	C	60s
178.2781	178.3799	135	CRI	C	60s
178.2950	178.3388	30	Shu	C	30s
178.3756	178.5548	201	deM	C	50s
178.4010	178.5131	184	VIR	C	45s
179.2933	179.4487	71	CRI	C	180s
179.3625	179.5553	240	deM	C	50s
180.0578	180.2164	195	Aka	C	60s
180.2321	180.3111	366	KU	C	15s
180.3077	180.5079	92	CRI	C	180s
181.0041	181.1988	711	KU	C	15s
181.0509	181.1820	358	Ioh	C	15s
182.3018	182.5007	133	CRI	C	120s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
182.3985	182.5936	165	Ham	C	90s
182.4023	182.4603	79	IMi	V	60s
183.0322	183.1542	294	Ioh	C	15s
183.1535	183.1918	120	KU	C	15s
183.3500	183.6056	312	Ham	C	60s
183.9424	184.1185	223	Aka	C	60s
183.9892	184.1896	249	KU	C	15s
184.2969	184.4258	131	DPV	C	30s
184.3007	184.4606	117	CRI	C	110s
184.3566	184.6071	305	Ham	C	60s
185.3574	185.6050	300	Ham	C	60s
185.3850	185.5023	54	CRI	C	180s
186.3510	186.6053	307	Ham	C	60s
186.9646	187.2131	339	Aka	C	60s
186.9663	187.1825	941	KU	C	15s
187.3066	187.5859	221	Shu	C	60s
187.3450	187.6042	225	Ham	C	90s
188.2825	188.5714	190	Shu	C	90s
188.2893	188.4902	133	CRI	C	90s
188.3728	188.6033	168	Ham	C	100s
189.0673	189.2310	422	Ioh	C	15s
189.2754	189.4815	141	CRI	C	120s
189.9888	190.1950	274	Aka	C	60s
190.0895	190.1488	75	KU	C	15s
190.2917	190.5815	198	Shu	C	90s
190.3822	190.5574	539	Rui	C	15s
190.4082	190.5689	209	IMi	C	60s
191.3340	191.5771	112	Shu	C	90s
192.2719	192.4692	106	CRI	C	150s
193.3115	193.5542	322	DPV	C	30s
194.3905	194.6037	182	Ham	C	90s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
194.9459	195.1434	273	Aka	C	60s
195.9465	196.1729	307	Aka	C	60s
197.2622	197.4690	97	CRI	C	180s
198.2712	198.4347	77	CRI	C	180s
199.0537	199.1781	169	Aka	C	60s
199.2778	199.4153	63	CRI	C	180s
199.9491	200.1868	325	Aka	C	60s
200.0005	200.1284	498	KU	C	15s
200.2561	200.4086	72	CRI	C	180s
200.3151	200.5465	295	DPV	C	30s
200.9485	201.1505	278	Aka	C	60s
201.0919	201.1445	182	KU	C	15s
201.2603	201.4184	73	CRI	C	180s
201.9539	202.0385	84	Aka	C	60s
202.0082	202.1413	381	KU	C	15s
202.3795	202.5834	174	Ham	C	90s
203.3797	203.4749	73	Ham	C	90s
204.3833	204.5628	152	Ham	C	90s
205.2796	205.4469	73	CRI	C	180s
205.9838	206.1055	100	Aka	C	60s
206.2906	206.4196	60	CRI	C	180s
207.2783	207.4128	63	CRI	C	180s
207.3619	207.5292	179	NKa	C	70s
208.2654	208.3942	50	CRI	C	180s
209.2673	209.3585	43	CRI	C	180s
210.2773	210.3011	9	CRI	C	180s
211.3259	211.5250	246	DPV	C	30s
211.3848	211.5817	169	Ham	C	90s
212.3393	212.5117	238	DPV	C	30s
212.3873	212.4283	20	CRI	C	180s
213.2956	213.3106	8	CRI	C	150s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.



Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
214.2643	214.3814	55	CRI	C	180s
214.3811	214.5731	165	Ham	C	90s
215.0263	215.1139	113	Aka	C	60s
216.9723	217.0540	109	Aka	C	60s
218.0176	218.1189	137	Aka	C	60s
218.2988	218.3742	36	CRI	C	180s
219.2860	219.3598	35	CRI	C	180s
220.2784	220.3522	35	CRI	C	180s
220.3614	220.3780	47	DPV	C	30s
221.2729	221.3488	36	CRI	C	180s
222.2933	222.4011	47	CRI	C	180s
233.9745	234.0597	119	Aka	C	60s
240.9856	241.0651	105	Aka	C	60s
252.9643	253.0706	145	Aka	C	60s
253.9688	254.0852	150	Aka	C	60s
255.0095	255.0776	93	Aka	C	60s
257.9896	258.0612	93	Aka	C	60s
258.9653	259.0434	109	Aka	C	60s
262.9793	263.0475	70	Aka	C	60s
400.6318	400.7674	170	deM	C	60s
401.6245	401.7610	177	deM	C	60s
402.5931	402.7667	224	deM	C	60s
405.1334	405.2534	187	OKU	C	30s
405.2411	405.3437	398	KU	C	15s
406.1739	406.2584	137	OKU	C	30s
407.2635	407.3860	274	OKU	C	30s
410.2192	410.3276	384	KU	C	15s
410.5449	410.7707	291	deM	C	60s
411.2529	411.3409	265	KU	C	15s
412.1101	412.2632	420	OKU	C	30s
412.1450	412.3155	240	OUS	C	60s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
412.2951	412.3847	410	KU	C	15s
413.1334	413.3133	251	OUS	C	60s
413.1844	413.2627	168	OKU	C	30s
414.5778	414.7722	259	deM	C	50s
415.5750	415.7719	264	deM	C	50s
416.5745	416.7721	264	deM	C	50s
417.5298	417.7721	323	deM	C	50s
418.5337	418.7723	318	deM	C	50s
419.5141	419.7658	335	deM	C	50s
420.1247	420.2652	392	OKU	C	20s
420.3159	420.3691	126	Mhh	C	30s
421.1969	421.3432	485	OKU	C	20s
421.4615	421.7712	372	deM	C	60s
422.2400	422.3598	427	KU	C	15s
422.5797	422.7709	243	deM	C	60s
423.5737	423.7441	220	deM	C	60s
424.4237	424.5677	68	CRI	C	180s
425.3279	425.3623	17	CRI	C	180s
425.6594	425.7673	142	deM	C	60s
427.2441	427.3234	99	OKU	C	60s
429.4212	429.7636	507	deM	C	50s
430.2972	430.3898	111	Aka	C	60s
430.4310	430.7641	498	deM	C	50s
431.0769	431.3908	327	Aka	C	60s
431.2887	431.3262	187	OKU	C	10s
431.4491	431.7639	473	deM	C	50s
432.0758	432.3870	421	Aka	C	60s
432.1526	432.2814	427	OKU	C	20s
432.4491	432.7222	393	deM	C	50s
432.7184	432.9505	549	SWI	C	30s
433.0257	433.1746	205	Aka	C	60s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
433.1181	433.1680	94	OKU	C	30s
433.4813	433.7120	345	deM	C	50s
433.7205	433.9592	568	SWI	C	30s
434.1071	434.1765	177	OKU	C	30s
434.1626	434.3934	319	Aka	C	60s
434.5138	434.7672	372	deM	C	50s
435.5183	435.7497	347	deM	C	50s
436.1334	436.3947	673	OKU	C	30s
436.1764	436.3933	297	Aka	C	60s
437.4966	437.7652	401	deM	C	50s
437.7663	438.0500	641	Ham	C	30s
438.1536	438.3321	464	OKU	C	30s
438.1763	438.3509	164	Aka	C	90s
438.5217	438.7653	362	deM	C	50s
439.6275	439.7226	146	deM	C	50s
440.6808	441.0009	754	Ham	C	30s
443.5130	443.7650	382	deM	C	50s
444.0133	444.2663	326	OKU	C	60s
444.2022	444.3335	630	KU	C	15s
444.5645	444.7650	302	deM	C	50s
444.6546	444.7029	108	Ham	C	30s
444.7109	444.9329	291	SWI	C	60s
445.0188	445.0727	73	OKU	C	60s
445.7030	445.9290	293	SWI	C	60s
445.8825	446.0523	397	Ham	C	30s
446.2813	446.5418	115	CRI	C	180s
446.6058	446.7651	246	deM	C	50s
446.6962	446.9253	554	SWI	C	30s
446.8826	447.0524	400	Ham	C	30s
447.6844	447.9262	585	SWI	C	30s
447.8823	448.0522	400	Ham	C	30s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
448.6161	448.7668	233	deM	C	50s
450.6018	450.7427	216	deM	C	50s
452.0434	452.2581	229	OKU	C	70s
452.6021	452.7675	175	deM	C	70s
452.6796	452.9170	570	SWI	C	30s
452.6944	452.8503	370	Ham	C	30s
453.1151	453.2357	166	OUS	C	60s
453.1175	453.2499	271	OKU	C	30s
453.8633	454.0501	440	Ham	C	30s
454.2662	454.5835	139	CRI	C	180s
454.6019	454.7676	256	deM	C	50s
455.2159	455.3197	142	Aka	C	60s
455.2260	455.6258	178	CRI	C	180s
455.7169	455.9063	456	SWI	C	30s
455.8659	456.0524	437	Ham	C	30s
456.6160	456.7662	232	deM	C	50s
456.6642	456.8992	568	SWI	C	30s
457.1511	457.3774	210	Aka	C	90s
457.4431	457.7029	632	DPV	C	30s
457.7519	457.8948	348	DPV	C	30s
457.8437	460.0401	2156	Ham	C	80s
458.0906	458.2346	192	Aka	C	60s
458.4367	458.6848	630	DPV	C	30s
459.1133	459.3638	329	Aka	C	30s
459.4343	459.7012	643	DPV	C	30s
459.7330	459.8952	395	SWI	C	30s
460.1322	460.3618	309	Aka	C	60s
460.4348	460.7003	290	DPV	C	30s
460.6249	460.7658	213	deM	C	50s
460.6403	460.8504	502	SWI	C	30s
460.8967	461.0397	329	Ham	C	30s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
461.2501	461.3572	90	Aka	C	90s
462.2115	462.3781	230	Aka	C	60s
462.2386	462.6140	166	CRI	C	180s
463.2313	463.4606	96	CRI	C	180s
463.6202	463.8805	628	SWI	C	30s
463.7050	463.9222	509	Ham	C	30s
464.2403	464.3568	50	CRI	C	180s
464.2898	464.7282	132	Ham	C	120s
465.1728	465.3753	184	Aka	C	90s
466.2170	466.3745	148	Aka	C	90s
466.2457	466.7264	147	Ham	C	120s
466.6072	466.8666	616	SWI	C	30s
467.2329	467.3667	115	Aka	C	90s
467.2831	467.5094	103	CRI	C	180s
467.6049	467.8667	620	SWI	C	30s
468.2095	468.3831	163	Aka	C	90s
468.2364	468.3052	33	CRI	C	180s
468.2570	468.7270	120	Ham	C	120s
468.6957	468.8701	414	CRI	C	30s
469.1586	469.3729	201	Aka	C	90s
469.2565	469.3371	53	Ham	C	120s
470.2396	470.4597	568	DPV	C	30s
471.2298	471.4295	519	DPV	C	30s
471.2369	471.3917	73	CRI	C	180s
471.5972	471.7469	329	Ham	C	30s
471.6105	471.8651	615	SWI	C	30s
472.2240	472.2862	160	DPV	C	30s
473.6029	473.8572	618	SWI	C	30s
473.8614	473.9463	40	APO	R	180s
473.8754	474.0234	445	AKz	C	30s
475.1651	475.3750	197	Aka	C	90s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
476.1801	476.3762	184	Aka	C	90s
476.6262	476.7501	192	deM	C	50s
476.8672	477.0150	329	Ham	C	30s
477.1710	477.3746	189	Aka	C	90s
477.3819	477.7083	159	Ham	C	120s
477.6162	477.7497	196	deM	C	50s
478.1433	478.3747	186	Aka	C	90s
478.2981	478.5067	135	CRI	C	120s
478.3459	478.6813	801	DPV	C	30s
478.6127	478.8440	563	SWI	C	30s
478.6163	478.7547	261	deM	C	40s
478.8616	479.0093	363	Ham	C	30s
479.3933	479.4937	61	Ham	C	30s
479.5935	479.7534	296	deM	C	40s
479.8589	480.0067	358	Ham	C	30s
480.5946	480.7275	180	deM	C	60s
480.8561	481.0039	359	Ham	C	30s
481.1812	481.4418	159	CRI	C	120s
481.8533	482.0011	358	Ham	C	30s
481.8559	481.9245	45	APO	R	90s
482.3181	482.7385	746	deM	C	40s
482.8505	482.9983	359	AKz	C	30s
482.8516	482.9193	40	APO	R	90s
483.8306	483.9266	60	APO	R	90s
483.8478	483.9956	358	AST	C	30s
484.0031	484.2401	340	OKU	C	50s
484.1190	484.3624	326	Aka	C	30s
484.3170	484.7377	754	deM	C	40s
484.8433	484.9371	39	APO	R	90s
484.8450	484.9424	234	AKz	C	30s
484.9443	485.0886	498	OKU	C	20s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
485.1385	485.3630	311	Aka	C	60s
485.3151	485.7127	723	deM	C	40s
485.5883	485.7823	326	LCO	B	40s
485.7142	485.9849	638	SWI	C	30s
486.3223	486.7257	690	deM	C	40s
486.7090	486.9844	646	SWI	C	30s
486.8394	486.9869	358	AKz	C	30s
487.1144	487.2779	226	Aka	C	60s
487.2788	487.3998	308	Kai	C	30s
487.3567	487.7180	647	deM	C	40s
487.8366	487.9848	145	AKz	C	30s
487.8438	487.9105	44	APO	R	90s
488.2550	488.4635	524	Kai	C	30s
489.3212	489.7185	725	deM	C	40s
489.8252	489.9030	40	APO	R	90s
489.8311	489.9792	145	AKz	C	30s
490.3179	490.7164	729	deM	C	40s
490.6968	491.0050	695	SWI	C	30s
490.8283	490.9042	50	APO	R	30s
490.8283	490.9769	145	AKz	C	30s
491.2290	491.4005	415	DPV	C	30s
491.7300	491.9911	608	SWI	C	30s
491.8255	491.9736	144	AKz	C	30s
491.8302	491.9222	60	APO	R	90s
492.2372	492.3971	418	DPV	C	30s
492.4199	492.7014	521	deM	C	40s
493.4081	493.6106	259	Vir	C	60s
493.4247	493.6060	336	deM	C	40s
494.3928	494.7048	404	NDJ	C	30s
494.4064	494.6458	440	deM	C	40s
495.2855	495.4244	44	Ham	C	120s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
495.4157	495.6274	392	deM	C	40s
496.3625	496.4006	100	CRI	C	30s
497.0856	497.3040	205	Aka	C	90s
497.0982	497.2520	200	OKU	C	60s
497.2990	497.3700	200	CRI	C	30s
497.6945	497.9609	630	SWI	C	30s
498.0884	498.3092	207	Aka	C	90s
498.5969	498.9545	347	AKz	C	30s
499.0839	499.3206	326	Aka	C	60s
499.3198	499.5987	394	deM	C	50s
499.3388	499.4757	40	Ham	C	120s
499.7511	499.8799	40	PSD	V	120s
499.9199	500.1075	449	OKU	C	30s
500.0322	500.1840	233	OUS	C	50s
500.1331	500.3276	268	Aka	C	60s
500.3244	500.5589	347	deM	C	50s
500.8087	500.8656	20	PSD	V	30s
501.1033	501.2522	140	Aka	C	90s
501.2746	501.4435	434	Kai	C	30s
501.2863	501.6939	125	Ham	C	120s
501.3128	501.4528	208	deM	C	50s
501.6869	501.9574	640	SWI	C	30s
502.1009	502.2563	66	Aka	C	90s
502.2646	502.4477	469	Kai	C	30s
502.3016	502.6906	118	Ham	C	120s
503.2504	503.5956	447	DPV	C	30s
503.2673	503.4509	476	Kai	C	30s
503.3325	503.4466	33	Ham	C	120s
503.8009	503.8698	45	APO	R	120s
504.2151	504.2519	18	CRI	C	180s
504.2594	504.6283	492	DPV	C	30s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.



Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
504.2781	504.3504	187	Kai	C	30s
504.3165	504.4709	229	deM	C	50s
504.4208	504.5776	106	Pol	V	60s
504.8086	504.8406	10	PSD	C	120s
505.2564	505.6423	512	DPV	C	30s
505.3086	505.4327	35	Ham	C	120s
505.3151	505.4790	232	deM	C	50s
506.2276	506.5491	148	CRI	C	180s
506.2974	506.6841	117	Ham	C	120s
506.3128	506.4788	247	deM	C	50s
507.0530	507.3031	232	Aka	C	90s
507.2217	507.6148	181	CRI	C	180s
507.2425	507.4697	304	DPV	C	30s
507.2747	507.4275	395	Kai	C	30s
508.0741	508.2984	204	Aka	C	90s
508.3443	508.6279	423	deM	C	50s
508.6670	508.9697	725	SWI	C	30s
508.7893	508.8575	45	APO	R	120s
509.2404	509.6015	475	DPV	C	30s
509.2740	509.4287	400	Kai	C	30s
509.2960	509.4775	120	Ham	C	120s
509.3142	509.6609	486	deM	C	50s
509.3807	509.4024	27	Vir	C	30s
509.6621	509.9606	712	SWI	C	30s
510.2730	510.6325	442	DPV	C	30s
510.2974	510.4779	118	Ham	C	120s
510.7116	510.9636	600	SWI	C	30s
511.2568	511.6364	492	DPV	C	30s
511.2986	511.4780	116	Ham	C	120s
511.3313	511.6014	215	CRI	C	100s
511.6616	511.9714	677	SWI	C	30s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
511.7843	511.8526	45	APO	R	120s
512.1064	512.1975	86	Aka	C	90s
512.3448	512.5341	142	CRI	C	100s
512.4610	512.6455	284	deM	C	50s
513.3008	513.4357	89	Ham	C	120s
513.3464	513.5437	295	deM	C	50s
513.6533	513.9256	650	SWI	C	30s
514.0302	514.2753	230	Aka	C	90s
514.3210	514.6426	509	deM	C	50s
514.6667	514.9506	678	SWI	C	30s
515.0450	515.2708	212	Aka	C	90s
515.3041	515.4358	87	Ham	C	120s
515.3188	515.5408	326	deM	C	50s
515.6622	515.9495	680	SWI	C	30s
516.6583	516.9533	697	SWI	C	30s
518.6527	518.9470	695	SWI	C	30s
519.0029	519.1708	230	OKU	C	60s
519.0214	519.2667	230	Aka	C	90s
519.2799	519.4124	350	Kai	C	30s
519.3333	519.5502	275	Vir	C	60s
519.6225	519.8238	128	APO	R	120s
519.9808	520.0929	150	OKU	C	60s
520.2885	520.3818	164	Kai	C	30s
520.3317	520.5676	300	Vir	C	60s
521.0101	521.2758	242	Aka	C	90s
521.3434	521.4133	90	Vir	C	60s
521.6488	521.9501	706	SWI	C	30s
521.9281	522.0740	188	OKU	C	60s
522.2675	522.5786	274	CRI	C	90s
522.6423	522.8950	590	SWI	C	30s
523.0150	523.1533	190	Aka	C	60s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
523.2013	523.4273	342	CRI	C	50s
524.2836	524.4310	389	Kai	C	30s
525.0338	525.2298	183	Aka	C	90s
525.1277	525.2002	100	OKU	C	60s
525.3529	525.6127	394	deM	C	50s
525.7207	525.9603	518	SWI	C	30s
526.1167	526.2295	142	OKU	C	60s
526.3328	526.6065	417	deM	C	50s
526.3806	526.4500	190	Kai	C	30s
527.2792	527.4898	274	DPV	C	60s
527.6442	527.9110	623	SWI	C	30s
528.2642	528.5209	348	DPV	C	60s
529.6486	529.7859	80	APO	R	140s
529.9942	530.1486	122	Aka	C	90s
530.3289	530.5774	365	deM	C	50s
531.3075	531.3456	18	CRI	C	180s
531.6870	531.9181	552	SWI	C	30s
532.0508	532.1893	190	OKU	C	50s
532.3580	532.5960	355	deM	C	50s
532.9351	533.1373	260	Aka	C	60s
533.0956	533.2099	157	OKU	C	60s
533.2494	533.5481	406	CRI	C	60s
533.3296	533.5460	311	deM	C	50s
533.6436	533.9217	664	SWI	C	30s
533.9785	534.2081	314	Aka	C	60s
533.9785	534.2092	427	OUS	C	45s
534.2506	534.4643	295	CRI	C	60s
534.3341	534.5567	338	deM	C	50s
534.3360	534.5821	153	Ham	C	120s
534.6287	534.9207	697	SWI	C	30s
535.0386	535.2630	260	Aka	C	60s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
535.0462	535.1690	449	OKU	C	15s
535.3321	535.5365	308	deM	C	50s
535.5784	535.6781	215	LCO	B	30s
535.6222	535.9074	681	SWI	C	30s
536.0508	536.1191	231	OKU	C	15s
536.6184	536.8982	668	SWI	C	30s
536.6505	536.8338	108	APO	R	120s
537.3684	537.5250	200	Vir	C	60s
538.3083	538.3851	206	Kai	C	30s
538.4307	538.5733	220	deM	C	50s
538.6251	538.9015	660	SWI	C	30s
539.3493	539.5169	258	deM	C	50s
540.2750	540.5251	345	CRI	C	60s
540.3359	540.5327	298	deM	C	50s
540.9447	541.2095	361	Aka	C	60s
541.0791	541.1865	252	OKU	C	30s
541.3390	541.5364	303	deM	C	50s
541.9404	542.0951	209	Aka	C	60s
542.3367	542.5314	295	deM	C	50s
542.6230	542.8038	432	SWI	C	30s
543.9660	544.2697	387	Aka	C	60s
544.9395	545.1760	319	Aka	C	60s
546.3242	546.5635	315	DPV	C	30s
551.0375	551.1909	199	Aka	C	60s
551.9365	552.1531	197	Aka	C	90s
553.2850	553.4517	468	CRI	C	20s
553.9543	554.1409	171	Aka	C	90s
554.3447	554.5049	450	CRI	C	20s
555.0010	555.1184	110	Aka	C	90s
556.9497	557.1381	173	Aka	C	90s
557.3725	557.5216	230	deM	C	50s

*a*:BJD−2455500.

*b*: 観測点数

*c*: 観測者コード

*d*: 測光バンド。 “C” は clear を示す.

Table 4: 観測リスト

Start <sup>a</sup>	End <sup>a</sup>	$N^b$	obs <sup>c</sup>	sys <sup>d</sup>	exp
557.9524	558.1406	145	Aka	C	90s
559.0003	559.1310	122	Aka	C	90s
559.9481	560.1253	165	Aka	C	90s
563.9978	564.1136	156	Aka	C	60s
569.3144	569.3755	74	Vol	Rc	60s
570.0090	570.1217	104	Aka	C	90s
570.9599	571.1088	137	Aka	C	90s
574.0236	574.1456	101	Aka	C	90s
574.9683	575.1525	172	Aka	C	90s
575.9570	576.0648	97	Aka	C	90s
576.9617	577.1256	137	Aka	C	90s
577.6484	577.7664	281	SWI	C	30s
581.9754	582.1114	181	Aka	C	60s
588.9636	589.1050	196	Aka	C	60s
590.6471	590.7641	280	SWI	C	30s
591.9666	592.1211	214	Aka	C	60s

*a*:BJD−2455500.  
*b*: Number of observations.  
*c*: Observer’s code.  
*d*: Filter. “C” means no filter (clear).

## B Negative Superhump の極大時刻リスト

Table 5: Supercycle 2011 S1 中における Negative Superhump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
0	91.0210	0.0010	0.0010
1	91.0857	0.0034	0.0014
2	91.1366	−0.0081	0.0010
3	91.2149	0.0079	0.0004
4	91.2706	0.0012	0.0003
5	91.3319	0.0002	0.0003

*a*:BJD−2455500

Table 5: Supercycle 2011 S1 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
8	91.5213	0.0026	0.0006
9	91.5830	0.0020	0.0003
10	91.6479	0.0045	0.0004
11	91.7092	0.0035	0.0005
13	91.8352	0.0048	0.0004
14	91.8990	0.0063	0.0005
15	91.9561	0.0010	0.0003
16	92.0147	-0.0028	0.0011
17	92.0853	0.0055	0.0009
18	92.1492	0.0071	0.0006
19	92.2114	0.0069	0.0007
26	92.6447	0.0039	0.0009
27	92.7049	0.0017	0.0006
31	92.9549	0.0024	0.0025
32	93.0163	0.0015	0.0007
33	93.0815	0.0043	0.0010
34	93.1446	0.0051	0.0005
35	93.2025	0.0006	0.0007
36	93.2664	0.0022	0.0006
37	93.3282	0.0016	0.0006
38	93.3887	-0.0002	0.0003
39	93.4558	0.0045	0.0003
41	93.5811	0.0051	0.0004
42	93.6439	0.0056	0.0004
43	93.7080	0.0074	0.0006
44	93.7701	0.0071	0.0005
48	94.0174	0.0051	0.0009
49	94.0838	0.0092	0.0004
50	94.1466	0.0096	0.0002
51	94.2089	0.0096	0.0003
52	94.2645	0.0028	0.0003
53	94.3308	0.0068	0.0005
56	94.5217	0.0106	0.0007
$a$ :BJD-2455500			

Table 5: Supercycle 2011 S1 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
57	94.5786	0.0052	0.0004
58	94.6466	0.0109	0.0005
59	94.7129	0.0148	0.0017
65	95.0800	0.0079	0.0006
66	95.1399	0.0055	0.0006
67	95.2012	0.0044	0.0005
68	95.2673	0.0082	0.0004
69	95.3294	0.0079	0.0008
73	95.5839	0.0131	0.0011
74	95.6443	0.0111	0.0003
75	95.7037	0.0082	0.0005
80	96.0138	0.0066	0.0009
81	96.0797	0.0101	0.0005
82	96.1415	0.0096	0.0012
83	96.2059	0.0117	0.0005
84	96.2665	0.0099	0.0004
85	96.3263	0.0074	0.0008
86	96.3907	0.0094	0.0007
87	96.4507	0.0071	0.0003
88	96.5141	0.0082	0.0013
89	96.5767	0.0084	0.0004
90	96.6424	0.0118	0.0003
92	96.7647	0.0094	0.0005
97	97.0762	0.0092	0.0008
98	97.1412	0.0119	0.0008
99	97.2086	0.0169	0.0015
100	97.2631	0.0091	0.0006
101	97.3310	0.0146	0.0012
102	97.3904	0.0117	0.0011
103	97.4557	0.0146	0.0005
104	97.5151	0.0118	0.0003
105	97.5805	0.0148	0.0004
106	97.6441	0.0161	0.0005
$a$ :BJD-2455500			

Table 5: Supercycle 2011 S1 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
107	97.6968	0.0064	0.0004
112	98.0188	0.0167	0.0024
113	98.0816	0.0172	0.0013
114	98.1413	0.0145	0.0007
115	98.2044	0.0153	0.0008
116	98.2669	0.0154	0.0005
117	98.3234	0.0096	0.0003
118	98.3977	0.0216	0.0014
119	98.4545	0.0161	0.0011
120	98.5081	0.0073	0.0010
121	98.5759	0.0127	0.0008
122	98.6327	0.0073	0.0003
123	98.6976	0.0098	0.0011
124	98.7624	0.0122	0.0081
125	98.8246	0.0121	0.0007
126	98.8850	0.0101	0.0011
130	99.1398	0.0156	0.0008
131	99.1883	0.0018	0.0085
133	99.3225	0.0113	0.0030
134	99.3823	0.0088	0.0014
135	99.4515	0.0156	0.0006
136	99.5140	0.0158	0.0004
137	99.5756	0.0151	0.0005
138	99.6382	0.0153	0.0003
139	99.7031	0.0179	0.0005
145	100.0738	0.0145	0.0012
146	100.1355	0.0138	0.0012
147	100.2015	0.0175	0.0005
148	100.2652	0.0189	0.0004
149	100.3243	0.0156	0.0007
150	100.3838	0.0128	0.0011
151	100.4450	0.0117	0.0005
154	100.6386	0.0182	0.0003
$a$ :BJD-2455500			



Table 5: Supercycle 2011 S1 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
155	100.6965	0.0138	0.0005
156	100.7617	0.0167	0.0007
157	100.8236	0.0162	0.0009
158	100.8832	0.0135	0.0008
159	100.9479	0.0159	0.0002
160	101.0072	0.0128	0.0003
165	101.3212	0.0151	0.0005
166	101.3789	0.0105	0.0004
167	101.4425	0.0117	0.0013
168	101.5147	0.0216	0.0007
169	101.5705	0.0151	0.0002
170	101.6316	0.0139	0.0002
176	102.0040	0.0121	0.0012
177	102.0636	0.0094	0.0011
178	102.1317	0.0152	0.0005
179	102.1937	0.0149	0.0007
181	102.3143	0.0107	0.0005
182	102.3787	0.0128	0.0002
186	102.6321	0.0168	0.0005
187	102.6930	0.0154	0.0003
188	102.7587	0.0188	0.0006
189	102.8188	0.0166	0.0007
190	102.8770	0.0125	0.0006
191	102.9407	0.0138	0.0003
192	103.0038	0.0145	0.0008
198	103.3778	0.0145	0.0012
199	103.4415	0.0158	0.0022
202	103.6263	0.0136	0.0011
203	103.6883	0.0133	0.0003
204	103.7560	0.0186	0.0008
206	103.8776	0.0156	0.0007
207	103.9370	0.0126	0.0006
208	104.0043	0.0176	0.0009
$\alpha$ :BJD-2455500			

Table 5: Supercycle 2011 S1 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
214	104.3729	0.0121	0.0009
215	104.4386	0.0155	0.0005
216	104.5010	0.0155	0.0005
218	104.6293	0.0192	0.0006
219	104.6846	0.0121	0.0004
220	104.7535	0.0187	0.0006
221	104.8090	0.0119	0.0004
222	104.8762	0.0167	0.0002
223	104.9395	0.0177	0.0009
224	104.9994	0.0152	0.0002
225	105.0629	0.0164	0.0005
226	105.1244	0.0155	0.0004
227	105.1875	0.0164	0.0003
228	105.2468	0.0133	0.0008
229	105.3077	0.0119	0.0010
230	105.3742	0.0160	0.0003
235	105.6906	0.0207	0.0006
236	105.7487	0.0165	0.0005
237	105.8112	0.0167	0.0006
238	105.8663	0.0094	0.0006
239	105.9344	0.0152	0.0015
240	106.0046	0.0231	0.0009
241	106.0580	0.0140	0.0011
242	106.1221	0.0158	0.0008
243	106.1854	0.0168	0.0019
248	106.4954	0.0151	0.0005
250	106.6221	0.0171	0.0003
251	106.6792	0.0119	0.0004
252	106.7460	0.0163	0.0004
253	106.8057	0.0137	0.0011
254	106.8708	0.0164	0.0013
261	107.3024	0.0116	0.0007
262	107.3662	0.0131	0.0006
$a$ :BJD-2455500			

Table 5: Supercycle 2011 S1 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
268	107.7360	0.0088	0.0010
269	107.8029	0.0134	0.0004
270	107.8591	0.0073	0.0005
272	107.9807	0.0042	0.0008
273	108.0522	0.0134	0.0008
274	108.1067	0.0056	0.0005
275	108.1797	0.0162	0.0003
276	108.2419	0.0161	0.0012
278	108.3574	0.0069	0.0004
279	108.4284	0.0155	0.0009
284	108.7351	0.0105	0.0007
285	108.7976	0.0107	0.0004
286	108.8617	0.0124	0.0002
287	108.9258	0.0142	0.0009
288	108.9900	0.0161	0.0004
300	109.7315	0.0095	0.0021
301	109.7956	0.0112	0.0008
302	109.8582	0.0116	0.0008
310	110.3521	0.0067	0.0009
311	110.4163	0.0085	0.0006
320	110.9740	0.0052	0.0011
321	111.0405	0.0093	0.0007
322	111.1021	0.0086	0.0011
323	111.1697	0.0139	0.0009
324	111.2291	0.0110	0.0009
325	111.2820	0.0015	0.0006
326	111.3529	0.0100	0.0007
331	111.6634	0.0089	0.0004
332	111.7235	0.0066	0.0006
347	112.6572	0.0053	0.0008
348	112.7221	0.0078	0.0007
349	112.7834	0.0067	0.0004
353	113.0335	0.0074	0.0008
$a$ :BJD-2455500			

Table 5: Supercycle 2011 S1 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
354	113.0937	0.0054	0.0004
356	113.2221	0.0091	0.0008
357	113.2797	0.0044	0.0007
358	113.3427	0.0050	0.0007
359	113.4082	0.0081	0.0008
360	113.4722	0.0098	0.0020
361	113.5312	0.0064	0.0005
362	113.5956	0.0085	0.0005
363	113.6552	0.0058	0.0005
367	113.9015	0.0027	0.0035
368	113.9701	0.0089	0.0005
369	114.0324	0.0089	0.0005
370	114.0935	0.0077	0.0004
371	114.1530	0.0049	0.0004
373	114.2806	0.0078	0.0009
374	114.3419	0.0068	0.0003
375	114.4033	0.0058	0.0003
376	114.4689	0.0091	0.0006
377	114.5306	0.0084	0.0004
378	114.5926	0.0081	0.0004
379	114.6569	0.0100	0.0004
380	114.7153	0.0061	0.0006
381	114.7800	0.0085	0.0003
382	114.8435	0.0096	0.0002
384	114.9694	0.0109	0.0007
385	115.0326	0.0117	0.0007
386	115.0927	0.0095	0.0003
387	115.1559	0.0103	0.0010
388	115.2147	0.0068	0.0006
389	115.2835	0.0132	0.0008
390	115.3399	0.0073	0.0010
392	115.4709	0.0136	0.0010
393	115.5332	0.0136	0.0018
$a$ :BJD-2455500			

Table 5: Supercycle 2011 S1 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
392	115.4717	0.0144	0.0006
395	115.6529	0.0086	0.0011
396	115.7114	0.0048	0.0016
397	115.7713	0.0023	0.0007
398	115.8365	0.0052	0.0004
399	115.9003	0.0066	0.0005
402	116.0850	0.0043	0.0005
404	116.2054	0.0001	0.0035
405	116.2673	-0.0003	0.0006
406	116.3333	0.0032	0.0007
407	116.4015	0.0091	0.0004
408	116.4596	0.0049	0.0007
409	116.5183	0.0013	0.0006
410	116.5866	0.0072	0.0008
411	116.6450	0.0033	0.0006
412	116.7064	0.0023	0.0007
413	116.7785	0.0120	0.0007
414	116.8341	0.0054	0.0006
415	116.9003	0.0092	0.0004
419	117.1423	0.0019	0.0006
420	117.2070	0.0042	0.0005
421	117.2664	0.0012	0.0009
422	117.3272	-0.0003	0.0017
423	117.3932	0.0034	0.0006
425	117.5156	0.0011	0.0029
426	117.5742	-0.0027	0.0005
427	117.6438	0.0046	0.0008
428	117.6991	-0.0024	0.0004
429	117.7643	0.0004	0.0005
428	117.6994	-0.0021	0.0003
431	117.9065	0.0179	0.0012
433	118.0121	-0.0011	0.0038
434	118.0766	0.0010	0.0009
$\alpha$ :BJD-2455500			

Table 5: Supercycle 2011 S1 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
435	118.1405	0.0026	0.0004
436	118.1950	-0.0052	0.0007
438	118.3208	-0.0042	0.0003
439	118.3887	0.0014	0.0004
442	118.5750	0.0007	0.0009
443	118.6307	-0.0059	0.0006
444	118.6970	-0.0020	0.0005
445	118.7583	-0.0030	0.0005
446	118.8207	-0.0029	0.0007
447	118.8825	-0.0035	0.0005
448	118.9472	-0.0011	0.0009
449	119.0081	-0.0026	0.0006
450	119.0679	-0.0051	0.0007
454	119.3141	-0.0083	0.0020
455	119.3818	-0.0029	0.0009
456	119.4451	-0.0019	0.0021
459	119.6273	-0.0068	0.0012
469	120.2506	-0.0069	0.0004
470	120.3179	-0.0019	0.0016
471	120.3768	-0.0054	0.0014
472	120.4399	-0.0046	0.0004
475	120.6285	-0.0030	0.0007
476	120.6791	-0.0147	0.0006
477	120.7492	-0.0070	0.0003
478	120.8101	-0.0084	0.0007
479	120.8775	-0.0033	0.0006
480	120.9259	-0.0173	0.0007
487	121.3760	-0.0035	0.0014
489	121.4915	-0.0127	0.0010
492	121.6760	-0.0153	0.0002
493	121.7374	-0.0162	0.0015
494	121.7993	-0.0167	0.0004
<hr/> $\alpha$ :BJD-2455500 <hr/>			

Table 6: Supercycle 2011 S2 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
0	142.3454	-0.0006	0.0005
1	142.4068	-0.0016	0.0004
2	142.4684	-0.0023	0.0009
3	142.5290	-0.0040	0.0007
10	142.9677	-0.0017	0.0012
11	143.0307	-0.0011	0.0011
13	143.1522	-0.0042	0.0019
14	143.2161	-0.0026	0.0010
15	143.2793	-0.0018	0.0014
16	143.3413	-0.0021	0.0008
17	143.4055	-0.0002	0.0006
18	143.4689	0.0008	0.0006
19	143.5318	0.0014	0.0004
20	143.5954	0.0026	0.0008
21	143.6527	-0.0024	0.0005
23	143.7788	-0.0010	0.0005
24	143.8478	0.0056	0.0006
27	144.0266	-0.0026	0.0014
28	144.0810	-0.0105	0.0013
29	144.1471	-0.0068	0.0020
30	144.2141	-0.0020	0.0006
31	144.2813	0.0028	0.0008
32	144.3421	0.0012	0.0006
33	144.4076	0.0044	0.0005
34	144.4658	0.0003	0.0026
35	144.5267	-0.0011	0.0003
36	144.5886	-0.0016	0.0005
37	144.6576	0.0051	0.0005
38	144.7142	-0.0007	0.0013
39	144.7790	0.0018	0.0007
40	144.8413	0.0017	0.0004
42	144.9687	0.0044	0.0013
43	145.0284	0.0018	0.0009
$a$ :BJD-2455500			

Table 6: Supercycle 2011 S2 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
44	145.0887	-0.0002	0.0008
45	145.1539	0.0026	0.0007
46	145.2155	0.0019	0.0007
47	145.2783	0.0023	0.0013
48	145.3405	0.0022	0.0009
49	145.3999	-0.0007	0.0008
50	145.4638	0.0009	0.0011
51	145.5249	-0.0004	0.0010
53	145.6530	0.0030	0.0008
54	145.7172	0.0049	0.0006
55	145.7802	0.0055	0.0009
56	145.8386	0.0016	0.0008
57	145.9026	0.0033	0.0003
61	146.1581	0.0094	0.0012
62	146.2145	0.0035	0.0006
63	146.2764	0.0031	0.0005
64	146.3406	0.0049	0.0008
65	146.3995	0.0015	0.0006
66	146.4646	0.0043	0.0008
67	146.5278	0.0051	0.0005
68	146.5906	0.0056	0.0018
70	146.7147	0.0049	0.0007
72	146.8375	0.0031	0.0003
73	146.9020	0.0052	0.0011
74	146.9617	0.0026	0.0004
75	147.0288	0.0073	0.0003
76	147.0829	-0.0009	0.0008
77	147.1530	0.0069	0.0004
78	147.2076	-0.0008	0.0007
79	147.2728	0.0020	0.0004
80	147.3350	0.0019	0.0005
81	147.3984	0.0029	0.0006
82	147.4574	-0.0004	0.0003
<sup>a</sup> :BJD-2455500			



Table 6: Supercycle 2011 S2 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
85	147.6501	0.0052	0.0006
86	147.7097	0.0025	0.0018
87	147.7691	-0.0004	0.0002
88	147.8363	0.0045	0.0005
91	148.0200	0.0012	0.0006
92	148.0854	0.0042	0.0006
93	148.1477	0.0042	0.0005
94	148.2075	0.0017	0.0004
95	148.2732	0.0050	0.0004
96	148.3331	0.0026	0.0006
97	148.3977	0.0048	0.0003
98	148.4612	0.0060	0.0005
101	148.6461	0.0039	0.0004
102	148.7110	0.0064	0.0005
104	148.8320	0.0027	0.0006
105	148.8975	0.0059	0.0004
106	148.9561	0.0022	0.0007
107	149.0177	0.0014	0.0016
108	149.0844	0.0057	0.0004
109	149.1472	0.0062	0.0003
110	149.2085	0.0052	0.0004
111	149.2722	0.0065	0.0007
112	149.3324	0.0045	0.0004
113	149.3925	0.0022	0.0013
114	149.4613	0.0086	0.0003
115	149.5181	0.0031	0.0009
116	149.5819	0.0046	0.0003
117	149.6458	0.0061	0.0005
118	149.7082	0.0062	0.0010
127	150.2692	0.0061	0.0008
128	150.3324	0.0070	0.0006
129	150.3943	0.0066	0.0013
130	150.4555	0.0055	0.0005
$\alpha$ :BJD-2455500			

Table 6: Supercycle 2011 S2 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
131	150.5220	0.0096	0.0003
132	150.5809	0.0062	0.0005
133	150.6438	0.0067	0.0005
134	150.7072	0.0077	0.0006
135	150.7699	0.0081	0.0004
138	150.9554	0.0066	0.0004
139	151.0228	0.0117	0.0006
140	151.0786	0.0051	0.0005
141	151.1473	0.0115	0.0008
142	151.2041	0.0060	0.0007
143	151.2635	0.0031	0.0006
145	151.3880	0.0028	0.0018
146	151.4540	0.0065	0.0006
147	151.5133	0.0035	0.0009
148	151.5875	0.0153	0.0007
155	152.0135	0.0049	0.0004
156	152.0766	0.0057	0.0005
157	152.1396	0.0064	0.0006
158	152.2037	0.0081	0.0005
159	152.2618	0.0039	0.0011
160	152.3226	0.0024	0.0014
161	152.3915	0.0089	0.0005
162	152.4547	0.0097	0.0011
163	152.5160	0.0087	0.0005
164	152.5755	0.0059	0.0005
165	152.6365	0.0045	0.0006
166	152.6987	0.0045	0.0003
167	152.7658	0.0092	0.0005
168	152.8256	0.0067	0.0006
169	152.8937	0.0124	0.0007
170	152.9515	0.0079	0.0006
171	153.0137	0.0077	0.0015
172	153.0902	0.0219	0.0021
$\alpha$ :BJD-2455500			

Table 6: Supercycle 2011 S2 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
174	153.2061	0.0131	0.0010
176	153.3277	0.0100	0.0009
177	153.3902	0.0102	0.0011
178	153.4479	0.0055	0.0006
181	153.6401	0.0108	0.0006
182	153.7014	0.0097	0.0008
183	153.7580	0.0039	0.0004
184	153.8180	0.0016	0.0003
185	153.8802	0.0015	0.0004
187	154.0084	0.0050	0.0012
194	154.4416	0.0018	0.0021
195	154.5049	0.0028	0.0005
196	154.5699	0.0055	0.0006
197	154.6327	0.0059	0.0007
198	154.6929	0.0037	0.0009
202	154.9366	-0.0018	0.0023
203	155.0050	0.0042	0.0005
204	155.0681	0.0050	0.0007
205	155.1314	0.0059	0.0003
206	155.1909	0.0030	0.0004
207	155.2549	0.0048	0.0004
208	155.3143	0.0018	0.0006
209	155.3789	0.0041	0.0006
210	155.4403	0.0031	0.0006
211	155.5043	0.0047	0.0004
212	155.5666	0.0048	0.0009
213	155.6312	0.0070	0.0005
219	156.0015	0.0032	0.0005
220	156.0659	0.0053	0.0005
221	156.1251	0.0022	0.0005
222	156.1906	0.0054	0.0006
223	156.2491	0.0015	0.0005
227	156.5012	0.0043	0.0014
$\alpha$ :BJD-2455500			

Table 6: Supercycle 2011 S2 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
228	156.5634	0.0041	0.0003
235	156.9970	0.0013	0.0005
236	157.0610	0.0030	0.0007
237	157.1234	0.0031	0.0002
238	157.1854	0.0028	0.0003
239	157.2550	0.0099	0.0207
240	157.3143	0.0069	0.0007
241	157.3705	0.0008	0.0004
242	157.4323	0.0003	0.0004
243	157.4955	0.0011	0.0006
244	157.5601	0.0034	0.0009
245	157.6205	0.0014	0.0009
252	158.0606	0.0052	0.0006
253	158.1237	0.0060	0.0007
254	158.1770	-0.0031	0.0008
259	158.4893	-0.0025	0.0009
260	158.5545	0.0004	0.0010
261	158.6128	-0.0037	0.0005
262	158.6776	-0.0013	0.0005
268	159.0541	0.0013	0.0004
269	159.1116	-0.0036	0.0009
288	160.2913	-0.0084	0.0005
289	160.3576	-0.0043	0.0006
291	160.4815	-0.0051	0.0003
292	160.5446	-0.0044	0.0006
293	160.6096	-0.0018	0.0005
305	161.3556	-0.0038	0.0035
306	161.4259	0.0041	0.0022
307	161.4726	-0.0115	0.0011
308	161.5416	-0.0048	0.0013
309	161.5983	-0.0105	0.0010
317	162.1020	-0.0055	0.0011
318	162.1712	0.0014	0.0020
$a$ :BJD-2455500			

Table 6: Supercycle 2011 S2 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
319	162.2307	-0.0015	0.0050
321	162.3518	-0.0050	0.0013
322	162.4054	-0.0137	0.0014
324	162.5348	-0.0090	0.0008
325	162.5992	-0.0070	0.0006
331	162.9636	-0.0166	0.0028
332	163.0307	-0.0118	0.0015
333	163.0867	-0.0182	0.0012
334	163.1572	-0.0100	0.0018
347	163.9683	-0.0093	0.0008
348	164.0291	-0.0109	0.0005
349	164.0899	-0.0124	0.0009
350	164.1563	-0.0083	0.0006
351	164.2141	-0.0128	0.0006
352	164.2787	-0.0107	0.0011
353	164.3354	-0.0163	0.0021
354	164.4021	-0.0119	0.0008
355	164.4618	-0.0145	0.0017
356	164.5239	-0.0148	0.0016
357	164.5894	-0.0116	0.0008
364	165.0257	-0.0117	0.0073
366	165.1510	-0.0111	0.0005
367	165.2098	-0.0146	0.0004
368	165.2776	-0.0091	0.0015
369	165.3414	-0.0077	0.0005
370	165.4011	-0.0104	0.0005
415	168.1891	-0.0275	0.0009
416	168.2492	-0.0298	0.0007
417	168.3176	-0.0238	0.0017
418	168.3796	-0.0241	0.0020
419	168.4389	-0.0271	0.0007
420	168.5040	-0.0244	0.0008
421	168.5636	-0.0271	0.0006
$\alpha$ :BJD-2455500			

Table 6: Supercycle 2011 S2 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
435	169.4300	-0.0334	0.0028
436	169.4970	-0.0288	0.0017
437	169.5568	-0.0313	0.0014
451	170.4902	-0.0330	0.0014
452	170.5532	-0.0323	0.0010
460	170.9884	-0.0335	0.0014
463	171.1720	-0.0370	0.0016
466	171.3632	-0.0328	0.0009
467	171.4263	-0.0318	0.0014
468	171.4883	-0.0324	0.0010
469	171.5508	-0.0322	0.0015
$\alpha$ :BJD-2455500			

Table 7: Supercycle 2011 S3 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
0	191.4019	-0.0031	0.0007
1	191.4632	-0.0041	0.0008
2	191.5268	-0.0028	0.0010
14	192.2708	-0.0065	0.0049
15	192.3389	-0.0007	0.0006
16	192.4021	0.0003	0.0008
17	192.4646	0.0004	0.0006
31	193.3354	-0.0010	0.0004
32	193.4005	0.0017	0.0005
33	193.4640	0.0030	0.0009
34	193.5271	0.0037	0.0018
48	194.4007	0.0051	0.0012
49	194.4621	0.0042	0.0008
50	194.5210	0.0008	0.0009
51	194.5859	0.0033	0.0006
57	194.9616	0.0052	0.0008
$\alpha$ :BJD-2455500			

Table 7: Supercycle 2011 S3 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
58	195.0240	0.0053	0.0014
59	195.0906	0.0096	0.0010
73	195.9585	0.0052	0.0010
74	196.0199	0.0044	0.0008
76	196.1391	-0.0011	0.0007
95	197.3279	0.0039	0.0007
96	197.3918	0.0055	0.0008
97	197.4532	0.0046	0.0018
111	198.3312	0.0104	0.0008
112	198.3932	0.0100	0.0011
123	199.0810	0.0124	0.0015
124	199.1380	0.0072	0.0008
127	199.3259	0.0081	0.0010
128	199.3872	0.0072	0.0016
138	200.0147	0.0116	0.0021
139	200.0641	-0.0013	0.0011
140	200.1353	0.0076	0.0012
143	200.3277	0.0131	0.0009
144	200.3891	0.0122	0.0006
145	200.4427	0.0034	0.0016
146	200.5142	0.0127	0.0007
154	201.0088	0.0088	0.0011
155	201.0771	0.0148	0.0017
156	201.1347	0.0102	0.0007
159	201.3233	0.0118	0.0009
160	201.3796	0.0058	0.0012
170	202.0009	0.0040	0.0011
171	202.0703	0.0111	0.0013
172	202.1287	0.0073	0.0004
177	202.4423	0.0093	0.0010
178	202.5016	0.0064	0.0006
179	202.5650	0.0074	0.0006
193	203.4386	0.0088	0.0005
$\alpha$ :BJD-2455500			

Table 7: Supercycle 2011 S3 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
209	204.4303	0.0036	0.0021
210	204.4949	0.0059	0.0008
223	205.3069	0.0079	0.0008
224	205.3685	0.0072	0.0010
225	205.4389	0.0153	0.0015
234	205.9934	0.0090	0.0011
235	206.0528	0.0061	0.0013
239	206.3033	0.0074	0.0021
240	206.3672	0.0090	0.0008
255	207.2995	0.0067	0.0015
256	207.3633	0.0083	0.0011
257	207.4256	0.0083	0.0005
258	207.4865	0.0068	0.0009
271	208.2957	0.0060	0.0017
272	208.3603	0.0084	0.0016
288	209.3500	0.0011	0.0010
321	211.3999	-0.0050	0.0006
322	211.4662	-0.0010	0.0007
323	211.5279	-0.0016	0.0015
337	212.4022	0.0004	0.0008
338	212.4617	-0.0024	0.0005
367	214.2770	0.0061	0.0039
368	214.3247	-0.0085	0.0012
369	214.3983	0.0027	0.0014
370	214.4530	-0.0049	0.0008
371	214.5138	-0.0063	0.0011
380	215.0692	-0.0117	0.0011
411	216.9987	-0.0136	0.0014
428	218.0501	-0.0214	0.0019
433	218.3678	-0.0153	0.0017
464	220.2951	-0.0194	0.0027
480	221.3068	-0.0046	0.0014
497	222.3590	-0.0116	0.0019
$\alpha$ :BJD-2455500			



Table 8: Supercycle 2012 S1 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
0	0.6919	0.0119	0.0008
1	0.7502	0.0080	0.0009
16	1.6849	0.0092	0.0009
17	1.7517	0.0138	0.0004
31	2.6249	0.0158	0.0010
32	2.6840	0.0126	0.0006
33	2.7472	0.0136	0.0010
72	5.1751	0.0145	0.0016
73	5.2297	0.0069	0.0006
74	5.2975	0.0125	0.0006
89	6.2314	0.0129	0.0006
106	7.2932	0.0168	0.0008
107	7.3574	0.0188	0.0005
159	10.5994	0.0248	0.0009
160	10.6621	0.0253	0.0007
161	10.7249	0.0259	0.0008
162	10.7794	0.0182	0.0024
185	12.2157	0.0231	0.0004
187	12.3359	0.0189	0.0004
201	13.2023	0.0140	0.0005
202	13.2718	0.0214	0.0010
224	14.6377	0.0182	0.0013
225	14.7083	0.0265	0.0006
226	14.7560	0.0121	0.0006
240	15.6290	0.0138	0.0008
241	15.6958	0.0184	0.0007
242	15.7551	0.0155	0.0008
256	16.6266	0.0158	0.0005
257	16.6822	0.0091	0.0013
258	16.7496	0.0143	0.0007
271	17.5624	0.0181	0.0010
273	17.6876	0.0188	0.0006
274	17.7460	0.0150	0.0007
<i>a</i> :BJD-2455900			

Table 8: Supercycle 2012 S1 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
287	18.5538	0.0138	0.0014
288	18.6211	0.0188	0.0026
289	18.6748	0.0103	0.0007
290	18.7524	0.0257	0.0010
306	19.7387	0.0164	0.0007
313	20.1770	0.0190	0.0007
314	20.2409	0.0206	0.0004
330	21.2310	0.0151	0.0005
331	21.2906	0.0125	0.0005
335	21.5473	0.0203	0.0012
336	21.6015	0.0122	0.0008
337	21.6687	0.0172	0.0003
338	21.7274	0.0137	0.0007
347	22.2821	0.0082	0.0004
348	22.3473	0.0113	0.0003
352	22.5939	0.0089	0.0012
353	22.6537	0.0065	0.0007
354	22.7152	0.0058	0.0008
368	23.5880	0.0074	0.0019
369	23.6587	0.0158	0.0008
370	23.7115	0.0064	0.0008
382	24.4623	0.0104	0.0020
383	24.5219	0.0078	0.0054
402	25.7031	0.0067	0.0005
403	25.7624	0.0037	0.0006
$a$ :BJD-2455900			

Table 9: Supercycle 2012 S2 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
0	43.5569	-0.0071	0.0004
1	43.6257	-0.0007	0.0007
$a$ :BJD-2455900			

Table 9: Supercycle 2012 S2 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
2	43.6850	-0.0037	0.0003
3	43.7526	0.0015	0.0004
8	44.0618	-0.0010	0.0008
9	44.1197	-0.0055	0.0004
10	44.1835	-0.0041	0.0008
11	44.2654	0.0154	0.0017
12	44.3027	-0.0096	0.0006
17	44.6160	-0.0081	0.0006
18	44.6802	-0.0063	0.0005
19	44.7437	-0.0051	0.0003
20	44.8049	-0.0064	0.0003
21	44.8697	-0.0039	0.0003
22	44.9345	-0.0015	0.0003
24	45.0607	0.0000	0.0008
35	45.7450	-0.0016	0.0010
36	45.8011	-0.0079	0.0007
37	45.8693	-0.0021	0.0012
38	45.9286	-0.0052	0.0011
39	45.9926	-0.0035	0.0006
45	46.3727	0.0024	0.0011
46	46.4400	0.0074	0.0009
47	46.4986	0.0036	0.0005
50	46.6838	0.0017	0.0007
52	46.8100	0.0032	0.0004
53	46.8625	-0.0067	0.0010
54	46.9418	0.0102	0.0011
55	46.9935	-0.0004	0.0006
67	47.7472	0.0049	0.0007
68	47.8111	0.0065	0.0004
69	47.8683	0.0013	0.0003
70	47.9341	0.0048	0.0005
71	47.9953	0.0036	0.0011
82	48.6836	0.0059	0.0006
$a$ :BJD-2455900			

Table 9: Supercycle 2012 S2 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
83	48.7411	0.0010	0.0005
114	50.6774	0.0041	0.0008
115	50.7451	0.0095	0.0020
137	52.1184	0.0108	0.0006
138	52.1761	0.0061	0.0005
146	52.6694	0.0006	0.0031
147	52.7411	0.0099	0.0002
149	52.8667	0.0107	0.0005
150	52.9204	0.0021	0.0043
154	53.1815	0.0138	0.0004
155	53.2298	-0.0003	0.0007
166	53.9270	0.0109	0.0006
167	53.9913	0.0129	0.0004
173	54.3571	0.0045	0.0009
174	54.4239	0.0089	0.0030
175	54.4871	0.0097	0.0006
177	54.6118	0.0098	0.0004
178	54.6730	0.0086	0.0005
187	55.2342	0.0085	0.0005
188	55.2925	0.0045	0.0004
189	55.3591	0.0087	0.0009
190	55.4233	0.0105	0.0006
191	55.4885	0.0133	0.0008
192	55.5500	0.0125	0.0008
193	55.6116	0.0118	0.0011
195	55.7398	0.0152	0.0005
196	55.7995	0.0126	0.0004
197	55.8576	0.0083	0.0009
198	55.9147	0.0030	0.0004
199	55.9842	0.0102	0.0006
200	56.0465	0.0101	0.0005
210	56.6596	-0.0004	0.0007
211	56.7285	0.0061	0.0002
$a$ :BJD-2455900			

Table 9: Supercycle 2012 S2 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
212	56.7908	0.0061	0.0014
213	56.8518	0.0047	0.0011
218	57.1558	-0.0031	0.0010
219	57.2291	0.0078	0.0006
220	57.2899	0.0062	0.0011
221	57.3534	0.0074	0.0006
223	57.4749	0.0041	0.0006
224	57.5327	-0.0003	0.0006
226	57.6528	-0.0050	0.0014
228	57.7883	0.0058	0.0009
229	57.8492	0.0043	0.0004
230	57.9130	0.0057	0.0032
231	57.9782	0.0086	0.0004
232	58.0582	0.0263	0.0052
234	58.1693	0.0126	0.0019
235	58.2270	0.0079	0.0007
236	58.2897	0.0083	0.0015
237	58.3511	0.0073	0.0012
238	58.4122	0.0060	0.0006
239	58.4766	0.0081	0.0004
240	58.5414	0.0106	0.0005
241	58.6007	0.0075	0.0007
242	58.6623	0.0067	0.0003
245	58.8461	0.0034	0.0003
246	58.9127	0.0076	0.0004
247	58.9789	0.0115	0.0006
248	59.0372	0.0074	0.0006
250	59.1678	0.0133	0.0011
251	59.2252	0.0084	0.0006
252	59.2854	0.0061	0.0010
254	59.4140	0.0100	0.0005
255	59.4742	0.0079	0.0014
256	59.5408	0.0122	0.0003
$a$ :BJD-2455900			

Table 9: Supercycle 2012 S2 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
257	59.6029	0.0119	0.0009
258	59.6563	0.0029	0.0008
259	59.7312	0.0155	0.0006
260	59.7876	0.0094	0.0008
261	59.8469	0.0064	0.0005
262	59.9110	0.0082	0.0007
263	59.9791	0.0139	0.0005
266	60.1653	0.0130	0.0011
267	60.2244	0.0097	0.0010
268	60.2827	0.0057	0.0006
269	60.3517	0.0123	0.0004
272	60.5384	0.0120	0.0007
273	60.5982	0.0093	0.0004
274	60.6600	0.0089	0.0022
275	60.7216	0.0081	0.0007
276	60.7866	0.0107	0.0003
277	60.8515	0.0132	0.0004
279	60.9712	0.0081	0.0003
280	61.0373	0.0119	0.0003
284	61.2839	0.0090	0.0012
300	62.2835	0.0109	0.0012
301	62.3517	0.0167	0.0007
303	62.4682	0.0086	0.0016
304	62.5336	0.0116	0.0016
305	62.5950	0.0106	0.0049
316	63.2821	0.0117	0.0016
317	63.3413	0.0085	0.0007
318	63.4045	0.0094	0.0014
322	63.6525	0.0079	0.0004
323	63.7118	0.0049	0.0011
324	63.7777	0.0084	0.0004
325	63.8424	0.0107	0.0003
326	63.9041	0.0101	0.0003
$a$ :BJD-2455900			

Table 9: Supercycle 2012 S2 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
332	64.2746	0.0064	0.0009
333	64.3369	0.0064	0.0008
334	64.3981	0.0052	0.0029
335	64.4622	0.0069	0.0009
336	64.5293	0.0116	0.0020
337	64.5895	0.0095	0.0015
338	64.6516	0.0092	0.0023
339	64.7115	0.0068	0.0025
347	65.2125	0.0089	0.0020
348	65.2719	0.0059	0.0012
349	65.3340	0.0056	0.0015
364	66.2550	-0.0088	0.0107
365	66.3299	0.0038	0.0013
366	66.3956	0.0071	0.0017
367	66.4532	0.0023	0.0080
368	66.5094	-0.0039	0.0051
369	66.5773	0.0017	0.0025
370	66.6383	0.0003	0.0021
371	66.7073	0.0069	0.0002
372	66.7645	0.0018	0.0003
373	66.8297	0.0047	0.0011
380	67.2594	-0.0022	0.0015
381	67.3275	0.0036	0.0014
382	67.3953	0.0090	0.0039
383	67.4477	-0.0010	0.0017
384	67.5073	-0.0037	0.0011
386	67.6395	0.0038	0.0004
387	67.7010	0.0029	0.0015
388	67.7612	0.0007	0.0007
389	67.8260	0.0032	0.0007
396	68.2569	-0.0025	0.0006
397	68.3225	0.0008	0.0014
398	68.3934	0.0094	0.0011
$a$ :BJD-2455900			

Table 9: Supercycle 2012 S2 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
399	68.4489	0.0024	0.0009
400	68.5112	0.0024	0.0048
401	68.5756	0.0044	0.0008
402	68.6375	0.0040	0.0011
404	68.7648	0.0065	0.0010
405	68.8215	0.0009	0.0004
411	69.1997	0.0049	0.0013
412	69.2693	0.0121	0.0008
413	69.3251	0.0056	0.0005
428	70.2563	0.0014	0.0018
429	70.3202	0.0029	0.0006
430	70.3757	-0.0039	0.0010
431	70.4457	0.0037	0.0008
444	71.2494	-0.0033	0.0024
445	71.3122	-0.0029	0.0010
446	71.3745	-0.0030	0.0008
450	71.6260	-0.0009	0.0006
451	71.6883	-0.0009	0.0004
453	71.8107	-0.0033	0.0003
460	72.2449	-0.0056	0.0008
483	73.6721	-0.0127	0.0005
484	73.7382	-0.0090	0.0005
485	73.8001	-0.0095	0.0006
486	73.8593	-0.0126	0.0024
487	73.9334	-0.0009	0.0029
488	73.9986	0.0020	0.0011
507	75.1697	-0.0119	0.0016
508	75.2275	-0.0164	0.0008
510	75.3576	-0.0110	0.0013
524	76.2239	-0.0177	0.0009
525	76.2906	-0.0135	0.0009
526	76.3473	-0.0191	0.0015
531	76.6570	-0.0213	0.0009
$\alpha$ :BJD-2455900			



Table 9: Supercycle 2012 S2 中における Negative Super-hump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
535	76.9046	-0.0231	0.0028
536	76.9652	-0.0249	0.0005
540	77.2188	-0.0207	0.0007
541	77.2757	-0.0261	0.0010
542	77.3456	-0.0186	0.0014
543	77.3995	-0.0271	0.0012
544	77.4730	-0.0159	0.0026
545	77.5165	-0.0347	0.0049
546	77.5930	-0.0207	0.0013
547	77.6582	-0.0178	0.0008
556	78.2144	-0.0229	0.0012
557	78.2700	-0.0296	0.0029
558	78.3321	-0.0299	0.0023
559	78.4029	-0.0214	0.0016
560	78.4656	-0.0211	0.0006
561	78.5323	-0.0168	0.0011
562	78.5949	-0.0165	0.0013
559	78.4023	-0.0220	0.0026
564	78.7156	-0.0205	0.0006
565	78.7758	-0.0227	0.0004
566	78.8431	-0.0178	0.0011
567	78.8988	-0.0245	0.0004
568	78.9645	-0.0211	0.0004
576	79.4610	-0.0235	0.0023
580	79.7065	-0.0274	0.0006
582	79.8861	$\Gamma 0.0350$	0.0004
583	79.9516	$\Gamma 0.0318$	0.0005
594	80.6291	$\Gamma 0.0404$	0.0005
598	80.8793	$\Gamma 0.0396$	0.0006
599	80.9474	$\Gamma 0.0338$	0.0003
604	81.2031	-0.0275	0.0010
606	81.3254	-0.0300	0.0024
615	81.9015	-0.0151	0.0005
$a$ :BJD-2455900			

Table 10: Supercycle 2012 S3 中における Negative Superhump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
0	97.1285	0.0055	0.0007
1	97.1998	0.0144	0.0011
2	97.2467	-0.0010	0.0010
3	97.3101	0.0001	0.0005
10	97.7459	-0.0005	0.0019
11	97.8009	-0.0078	0.0006
12	97.8725	0.0014	0.0007
13	97.9324	-0.0010	0.0004
16	98.1268	0.0064	0.0016
17	98.1821	-0.0007	0.0004
18	98.2440	-0.0012	0.0006
19	98.3111	0.0036	0.0007
24	98.6186	-0.0006	0.0020
25	98.6764	-0.0051	0.0012
26	98.7449	0.0010	0.0009
29	98.9216	-0.0093	0.0006
32	99.1179	0.0001	0.0019
33	99.1651	-0.0151	0.0014
34	99.2442	0.0016	0.0008
35	99.3059	0.0010	0.0009
36	99.3706	0.0034	0.0011
37	99.4256	-0.0040	0.0046
38	99.4864	-0.0055	0.0014
39	99.5562	0.0020	0.0006
43	99.8123	0.0087	0.0036
44	99.8596	-0.0064	0.0019
45	99.9348	0.0065	0.0016
46	99.9912	0.0005	0.0007
47	100.0521	-0.0009	0.0003
48	100.1164	0.0011	0.0006
49	100.1772	-0.0004	0.0007
50	100.2437	0.0037	0.0010
51	100.3063	0.0040	0.0013
<sup>a</sup> :BJD-2455900			

Table 10: Supercycle 2012 S3 中における Negative Superhump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
52	100.3700	0.0053	0.0007
53	100.4362	0.0092	0.0007
54	100.4960	0.0066	0.0006
55	100.5549	0.0032	0.0004
64	101.1046	-0.0082	0.0018
65	101.1817	0.0066	0.0004
66	101.2416	0.0042	0.0006
67	101.3031	0.0033	0.0007
68	101.3667	0.0046	0.0004
69	101.4326	0.0081	0.0003
70	101.4905	0.0037	0.0018
71	101.5597	0.0105	0.0009
72	101.6111	-0.0004	0.0015
73	101.6778	0.0040	0.0016
74	101.7428	0.0066	0.0003
75	101.7982	-0.0003	0.0004
76	101.8670	0.0061	0.0004
77	101.9293	0.0062	0.0004
82	102.2354	0.0005	0.0045
83	102.3024	0.0052	0.0014
84	102.3614	0.0018	0.0005
85	102.4294	0.0075	0.0012
89	102.6644	-0.0069	0.0017
99	103.3034	0.0087	0.0006
100	103.3635	0.0065	0.0004
101	103.4291	0.0098	0.0004
102	103.4956	0.0140	0.0012
103	103.5533	0.0093	0.0005
108	103.8699	0.0141	0.0015
114	104.2434	0.0137	0.0012
115	104.3011	0.0090	0.0005
116	104.3630	0.0085	0.0004
119	104.5510	0.0095	0.0007
$a$ :BJD-2455900			

Table 10: Supercycle 2012 S3 中における Negative Superhump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
120	104.6134	0.0096	0.0009
131	105.2997	0.0102	0.0008
132	105.3628	0.0109	0.0008
133	105.4323	0.0181	0.0006
134	105.4900	0.0135	0.0006
135	105.5506	0.0117	0.0008
136	105.6130	0.0118	0.0006
146	106.2346	0.0099	0.0025
147	106.3052	0.0182	0.0018
148	106.3596	0.0103	0.0007
149	106.4261	0.0145	0.0005
150	106.4897	0.0157	0.0011
151	106.5463	0.0100	0.0024
152	106.6084	0.0098	0.0024
153	106.6783	0.0173	0.0011
160	107.1090	0.0116	0.0009
161	107.1743	0.0146	0.0005
162	107.2327	0.0106	0.0015
163	107.3011	0.0167	0.0010
164	107.3592	0.0125	0.0003
165	107.4213	0.0122	0.0003
166	107.4855	0.0140	0.0010
167	107.5475	0.0137	0.0008
168	107.6096	0.0135	0.0015
177	108.1671	0.0099	0.0007
178	108.2313	0.0118	0.0005
179	108.2988	0.0169	0.0006
180	108.3652	0.0210	0.0008
181	108.4255	0.0189	0.0023
182	108.4826	0.0137	0.0012
183	108.5420	0.0108	0.0004
184	108.6097	0.0161	0.0022
186	108.7275	0.0092	0.0008
$\alpha$ :BJD-2455900			

Table 10: Supercycle 2012 S3 中における Negative Superhump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
187	108.7995	0.0189	0.0010
188	108.8556	0.0127	0.0006
195	109.2988	0.0195	0.0004
196	109.3589	0.0172	0.0003
197	109.4181	0.0141	0.0003
198	109.4814	0.0151	0.0004
199	109.5440	0.0154	0.0005
200	109.6085	0.0175	0.0004
201	109.6689	0.0155	0.0004
202	109.7318	0.0161	0.0009
203	109.7930	0.0150	0.0004
204	109.8587	0.0183	0.0006
205	109.9214	0.0188	0.0003
211	110.2958	0.0191	0.0004
212	110.3599	0.0209	0.0006
213	110.4176	0.0162	0.0005
214	110.4795	0.0157	0.0004
215	110.5428	0.0167	0.0008
216	110.6042	0.0158	0.0005
218	110.7313	0.0182	0.0004
219	110.7949	0.0194	0.0004
220	110.8566	0.0188	0.0014
221	110.9198	0.0197	0.0006
227	111.3036	0.0294	0.0010
229	111.4168	0.0179	0.0006
230	111.4847	0.0234	0.0004
231	111.5396	0.0160	0.0005
232	111.6095	0.0236	0.0006
233	111.6696	0.0213	0.0011
234	111.7295	0.0189	0.0004
236	111.8545	0.0193	0.0003
241	112.1665	0.0196	0.0010
245	112.3973	0.0010	0.0010
$\alpha$ :BJD-2455900			

Table 10: Supercycle 2012 S3 中における Negative Superhump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
246	112.4567	-0.0019	0.0025
248	112.6085	0.0252	0.0011
260	113.3509	0.0195	0.0013
261	113.4157	0.0220	0.0009
262	113.4774	0.0214	0.0011
266	113.7323	0.0269	0.0004
268	113.8440	0.0139	0.0011
273	114.1640	0.0222	0.0013
271	114.0452	0.0281	0.0012
273	114.1650	0.0232	0.0009
274	114.2261	0.0219	0.0008
276	114.3546	0.0258	0.0006
277	114.4196	0.0284	0.0005
278	114.4791	0.0255	0.0007
279	114.5433	0.0274	0.0006
280	114.6051	0.0269	0.0008
281	114.6646	0.0240	0.0007
283	114.7911	0.0259	0.0006
284	114.8540	0.0264	0.0004
285	114.9148	0.0249	0.0007
288	115.0969	0.0200	0.0078
289	115.1640	0.0247	0.0006
290	115.2175	0.0159	0.0013
292	115.3449	0.0186	0.0007
293	115.4055	0.0168	0.0023
294	115.4704	0.0195	0.0006
295	115.5328	0.0195	0.0005
298	115.7217	0.0214	0.0012
299	115.7842	0.0215	0.0002
300	115.8486	0.0236	0.0007
301	115.9119	0.0245	0.0004
313	116.6657	0.0303	0.0033
315	116.7813	0.0212	0.0006
$a$ :BJD-2455900			

Table 10: Supercycle 2012 S3 中における Negative Superhump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
316	116.8453	0.0229	0.0005
317	116.9064	0.0216	0.0003
347	118.7700	0.0150	0.0004
348	118.8358	0.0185	0.0008
349	118.8991	0.0194	0.0003
351	119.0274	0.0231	0.0008
352	119.0875	0.0208	0.0004
353	119.1507	0.0216	0.0006
354	119.2093	0.0180	0.0016
355	119.2810	0.0273	0.0006
356	119.3369	0.0208	0.0005
357	119.4001	0.0217	0.0006
358	119.4616	0.0209	0.0005
359	119.5241	0.0211	0.0007
361	119.6520	0.0243	0.0018
362	119.7117	0.0216	0.0006
363	119.7752	0.0228	0.0024
367	120.0270	0.0253	0.0007
368	120.0880	0.0238	0.0006
372	120.3375	0.0240	0.0008
375	120.4696	-0.0309	0.0006
383	121.0192	0.0200	0.0023
384	121.0776	0.0160	0.0018
385	121.1486	0.0247	0.0012
387	121.2695	0.0209	0.0010
389	121.3952	0.0219	0.0007
394	121.7065	0.0216	0.0005
396	121.8321	0.0224	0.0005
397	121.9005	0.0285	0.0010
398	121.9615	0.0272	0.0008
399	122.0202	0.0235	0.0016
405	122.3920	0.0213	0.0014
407	122.5128	0.0174	0.0011
$\alpha$ :BJD-2455900			

Table 10: Supercycle 2012 S3 中における Negative Superhump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
410	122.7073	0.0249	0.0010
411	122.7661	0.0214	0.0006
412	122.8336	0.0265	0.0007
416	123.0772	0.0207	0.0009
417	123.1422	0.0234	0.0013
419	123.2640	0.0205	0.0036
421	123.3998	0.0316	0.0019
436	124.3218	0.0186	0.0004
437	124.3862	0.0206	0.0010
448	125.0696	0.0182	0.0006
449	125.1290	0.0154	0.0006
450	125.1960	0.0200	0.0005
453	125.3841	0.0211	0.0005
454	125.4396	0.0142	0.0005
455	125.5072	0.0195	0.0007
456	125.5722	0.0222	0.0007
459	125.7548	0.0178	0.0018
460	125.8178	0.0184	0.0012
461	125.8774	0.0156	0.0004
462	125.9335	0.0095	0.0008
465	126.1205	0.0094	0.0025
466	126.1915	0.0181	0.0014
469	126.3737	0.0132	0.0009
471	126.4965	0.0113	0.0007
484	127.3128	0.0172	0.0014
485	127.3786	0.0207	0.0016
486	127.4282	0.0079	0.0009
490	127.6825	0.0129	0.0004
491	127.7365	0.0046	0.0010
492	127.8025	0.0082	0.0017
493	127.8728	0.0162	0.0007
500	128.3082	0.0152	0.0008
501	128.3750	0.0197	0.0020
$\alpha$ :BJD-2455900			



Table 10: Supercycle 2012 S3 中における Negative Superhump の極大時刻リスト

E	The timings of maximum <sup>a</sup>	$O - C$	error
502	128.4253	0.0076	0.0009
503	128.4947	0.0147	0.0006
522	129.6769	0.0124	0.0022
523	129.7289	0.0021	0.0008
528	130.0550	0.0165	0.0012
533	130.3596	0.0094	0.0007
534	130.4178	0.0052	0.0008
535	130.4837	0.0088	0.0006
536	130.5454	0.0082	0.0012
555	131.7311	0.0094	0.0006
556	131.7937	0.0097	0.0005
557	131.8586	0.0122	0.0012
<hr/> a:BJD-2455900 <hr/>			

## C 圧縮センシングについて

あるモデルを用いて観測値とモデルパラメータを得る、という逆問題を解くときに、モデルパラメータを  $\mathbf{x}$ 、観測値を  $\mathbf{y}$ 、モデルを  $A$  とおくとこの問題は

$$\mathbf{y} = A\mathbf{x} \quad (48)$$

というベクトルと行列を用いた問題として解釈することができる。この問題は、 $\mathbf{x}$  の成分の数が  $\mathbf{y}$  の成分の数より多い場合、測定誤差の分布に応じて解くことが可能である。例えば測定誤差がガウス分布に従う場合、求めたいモデルパラメータ  $\hat{\mathbf{x}}$  は、

$$\hat{\mathbf{x}} = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} \sum_i \left( y_i - \sum_j a_{ij} x_j \right)^2 \quad (49)$$

ただし、 $\underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmin}}$  は「以下の関数が最小値をとるような  $\mathbf{x}$ 」を示す。このとき、 $n$  次元ベクトル  $\mathbf{x}$  の  $p$  次ノルムを、

$$\|\hat{\mathbf{a}}\|_p = \left( \sum_i |x_i|^p \right)^{1/p} = \sqrt[p]{|x_1|^p + \cdots + |x_n|^p} \quad (50)$$

で定義すると、上の式は

$$\hat{\mathbf{x}} = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{y} - A\mathbf{x}\|_2^2 \quad (51)$$

と  $\mathbf{y}$  と  $A\mathbf{x}$  を用いて、2 次ノルムの 2 乗として書くことが出来る。

このような求め方は、一般的には  $\mathbf{x}$  の成分の数が  $\mathbf{y}$  の成分の数より少ない場合には正しい  $\hat{\mathbf{x}}$  を求めることができない。しかし、このモデルパラメータの要素のほとんどが 0 であるような場合には高精度で  $\hat{\mathbf{x}}$  を見積もることが可能な手法が存在する。

この手法では、最小化させる評価関数として  $\|\mathbf{y} - A\mathbf{x}\|$  の代わりに  $\|\mathbf{y} - A\mathbf{x}\| + \lambda \|\mathbf{x}\|_1$  を採用していることがポイントである。なお、 $\|\mathbf{x}\|_1$  は 1 次のノルムであり、 $\lambda$  はこれを重み付けする項である。

$\mathbf{x}$  がスパースであることを仮定したとき、そのうち 0 でない成分 (値を持つ要素が  $K$  個の場合、 $K$  スパースと呼ばれる) が最小となる  $\mathbf{x}$  を探す必要がある。しかし、このような「0 でない値を持つ要素の数」(0 次ノルム) を最小化するための計算量は  $N$  の指数関数的に増大することが知られていることから、より計算量の少ない手法を取る必要がある。

Candes et al. (2006)、Candes and Tao (2006)、Donoho (2006a)、Donoho (2006b) らの研究により、スパース性が十分に高い場合には 1 次のノルムを最小化することによって元の情報を再構成することが出来ることが明らかになった。同様の手法は Tibshirani (1996) によって LASSO として既に提案されていたが、これらの理論的な研究によりこの手法がスパースなデータの再構成のために有効であることが確かめられることとなった。

# Bibliography

- Andronov, I. L., Arai, K., Chinarova, L. L., Dorokhov, N. I., Dorokhova, T. N., Dumitrescu, A., Nogami, D., Kolesnikov, S. V., Lepardo, A., Mason, P. A., Matsumoto, K., Oprescu, G., Pajdosz, G., Passuelo, R., Patkos, L., Senio, D. S., Sostero, G., Suleimanov, V. F., Tremko, J., Zhukov, G. V., and Zola, S. (1999). A search for periodic and quasi-periodic photometric behavior in the cataclysmic variable TT Arietis. *AJ*, 117:574–586.
- Ayani, K. and Kato, T. (2006). Variable star in Leo. *Cent. Bur. Electron. Telegrams*, 753:1.
- Baba, H., Kato, T., Nogami, D., Hirata, R., Matsumoto, K., and Sadakane, K. (2000). Discovery of a new SU UMa-type dwarf nova, V1028 Cygni. *PASJ*, 52:429–436.
- Baba, H., Sadakane, K., Norimoto, Y., Ayani, K., Ioroi, M., Matsumoto, K., Nogami, D., Makita, M., and Kato, T. (2002). Spiral structure in WZ Sagittae around the 2001 outburst maximum. *PASJ*, 54:L7–L10.
- Bailey, J. (1979). Two cataclysmic variables similar to WZ Sagittae. *MNRAS*, 189:41P–44P.
- Barrett, P., O’Donoghue, D., and Warner, B. (1988). Photometry of the intermediate polar TV Columbae. *MNRAS*, 233:759–771.
- Bath, G. T. (1973). Periodicities and Disks in Dwarf Novae. *Nature Physical Science*, 246:84–87.
- Bonnet-Bidaud, J. M., Motch, C., and Mouchet, M. (1985). The continuum variability of the puzzling X-ray three-period cataclysmic variable 2A 0526–328 (TV Col). *A&A*, 143:313–320.

- Borucki, W. J., Koch, D., Basri, G., Batalha, N., Brown, T., Caldwell, D., Caldwell, J., Christensen-Dalsgaard, J., Cochran, W. D., DeVore, E., Dunham, E. W., Dupree, A. K., Gautier, T. N., Geary, J. C., Gilliland, R., Gould, A., Howell, S. B., Jenkins, J. M., Kondo, Y., Latham, D. W., Marcy, G. W., Meibom, S., Kjeldsen, H., Lissauer, J. J., Monet, D. G., Morrison, D., Sasselov, D., Tarter, J., Boss, A., Brownlee, D., Owen, T., Buzasi, D., Charbonneau, D., Doyle, L., Fortney, J., Ford, E. B., Holman, M. J., Seager, S., Steffen, J. H., Welsh, W. F., Rowe, J., Anderson, H., Buchhave, L., Ciardi, D., Walkowicz, L., Sherry, W., Horch, E., Isaacson, H., Everett, M. E., Fischer, D., Torres, G., Johnson, J. A., Endl, M., MacQueen, P., Bryson, S. T., Dotson, J., Haas, M., Kolodziejczak, J., Van Cleve, J., Chandrasekaran, H., Twicken, J. D., Quintana, E. V., Clarke, B. D., Allen, C., Li, J., Wu, H., Tenenbaum, P., Verner, E., Bruhweiler, F., Barnes, J., and Prsa, A. (2010). Kepler planet-detection mission: Introduction and first results. *Science*, 327:977.
- Candes, E. J., Romberg, J., and Tao, T. (2006). Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Transactions on Information Theory*, 52:489–509.
- Candes, E. J. and Tao, T. (2006). Near-optimal signal recovery from random projections: Universal encoding strategies? *IEEE Trans. Inf. Theory*, 52:5406.
- Cannizzo, J. K., Smale, A. P., Wood, M. A., Still, M. D., and Howell, S. B. (2012). The Kepler light curves of V1504 Cygni and V344 Lyrae: A study of the outburst properties. *ApJ*, 747:117.
- Cannizzo, J. K., Still, M. D., Howell, S. B., Wood, M. A., and Smale, A. P. (2010). The Kepler Light Curve of V344 Lyrae: Constraining the Thermal-viscous Limit Cycle Instability. *ApJ*, 725:1393–1404.
- Chou, Y., Grindlay, J. E., and Bloser, P. F. (2001). Timing analysis of the light curve of the dipping-bursting x-ray binary x1916-053. *ApJ*, 549:1135.
- Christensen, E. J. (2006). Variable star in Leo. *Cent. Bur. Electron. Telegrams*, 746.
- Cleveland, W. S. (1979). Robust locally weighted regression and smoothing scatter-plots. *J. Amer. Statist. Assoc.*, 74:829–836.
- Coyne, R., Shenoy, A., MacLachlan, G., Lewis, T., Dhuga, K., Eskandarian, A., Cobb, B., Maximon, L., and Parke, W. (2012). Infrahumps detected in Kepler light curve of V1504 Cygni. *MNRAS*, submitted(arXiv/1206.6762).

- Donoho, D. L. (2006a). Compressed sensing. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 52:1289.
- Donoho, D. L. (2006b). For most large underdetermined systems of linear equations the minimal  $\ell_1$ -norm solution is also the sparsest solution. *Communications on pure and applied mathematics*, 59:797.
- Downes, R. A. and Margon, B. (1981). On the nature of WX Ceti. *MNRAS*, 197:35P–38P.
- Drake, A. J., Djorgovski, S. G., Mahabal, A., Beshore, E., Larson, S., Graham, M. J., Williams, R., Christensen, E., Catelan, M., Boattini, A., Gibbs, A., Hill, R., and Kowalski, R. (2009). First results from the Catalina Real-Time Transient Survey. *ApJ*, 696:870–884.
- Evans, A., van Loon, J. T., Zijlstra, A. A., Pollacco, D., Smalley, B., Tyne, V. H., and Eyres, S. P. S. (2002). Ck vul: reborn perhaps, but not hibernating. *MNRAS*, 332:35P.
- Flannery, B. P. (1975). The location of the hot spot in cataclysmic variable stars as determined from particle trajectories. *MNRAS*, 170:325–331.
- Fu, H., Li, Z.-Y., Leung, K.-C., Zhang, Z.-S., Li, Z.-L., and Gaskell, C. M. (2004). A Photometry Campaign for IR Geminorum in Quiescence. *Chinese J. of Astron. and Astrophys.*, 4:88–96.
- Gänsicke, B. T., Dillon, M., Southworth, J., Thorstensen, J. R., Rodríguez-Gil, P., Aungwerojwit, A., Marsh, T. R., Szkody, P., Barros, S. C. C., Casares, J., de Martino, D., Groot, P. J., Hakala, P., Kolb, U., Littlefair, S. P., Martínez-Pais, I. G., Nelemans, G., and Schreiber, M. R. (2009). SDSS unveils a population of intrinsically faint cataclysmic variables at the minimum orbital period. *MNRAS*, 397:2170–2188.
- Gao, W., Li, Z., Wu, X., Zhang, Z., and Li, Y. (1999). Superhumps in a peculiar SU Ursae Majoris-type dwarf nova, ER Ursae Majoris. *ApJ*, 527:L55–L59.
- Gerend, D. and Boynton, P. E. (1976). Optical clues to the nature of Hercules X-1/HZ Herculis. *ApJ*, 209:562–573.
- Golovin, A., Ayani, K., Pavlenko, E. P., Krajci, T., Kuznyetsova, Y., Henden, A., Krushevskaya, V., Dvorak, S., Sokolovsky, K., Sergeeva, T. P., James, R., Crawford, T., and Corp, L. (2007). SDSS J102146.44+234926.3: New WZ Sge-type dwarf nova. *IBVS*, 5763.

- Golovin, A., Price, A., Templeton, M., Cook, L., Crawford, T., Henden, A., James, R., Koppelman, M., Nelson, P. R., Oksanen, A., Pavlenko, E., Pickard, R., Quinn, N., and Starkey, D. R. (2005). Multicolor Observations of ASAS 002511+1217.2. *IBVS*, 5611.
- Goodchild, S. and Ogilvie, G. (2006). The dynamics of eccentric accretion discs in superhump systems. *MNRAS*, 368:1123–1131.
- Green, R. F., Ferguson, D. H., Liebert, J., and Schmidt, M. (1982). Cataclysmic variable candidates from the Palomar Green survey. *PASP*, 94:560–564.
- Green, R. F., Schmidt, M., and Liebert, J. (1986). The Palomar-Green catalog of ultraviolet-excess stellar objects. *ApJS*, 61:305–352.
- Hōshi, R. (1979). Accretion Model for Outbursts of Dwarf Nova. *Progress of Theoretical Physics*, 61:1307–1319.
- Hameury, J.-M., Lasota, J.-P., and Warner, B. (2000). The zoo of dwarf novae: illumination, evaporation and disc radius variation. *A&A*, 353:244–252.
- Harvey, D., Skillman, D. R., Patterson, J., and Ringwald, F. A. (1995). Superhumps in cataclysmic binaries. V. V503 Cygni. *PASP*, 107:551–560.
- Heemskerk, M. H. M. (1994). Hydrodynamic calculations of accretion discs in close binaries. the superhump phenomenon. *A&A*, 288:807–818.
- Hellier, C. (2001). On echo outbursts and er uma supercycles in su uma-type cataclysmic variables. *PASP*, 113:469.
- Hertzog, K. P. (1986). Identification of ancient novae. *Observatory*, 106:38.
- Hirose, M. and Osaki, Y. (1990). Hydrodynamic simulations of accretion disks in cataclysmic variables – superhump phenomenon in SU UMa stars. *PASJ*, 42:135–163.
- Hirose, M. and Osaki, Y. (1993). Superhump periods in SU Ursae Majoris stars: Eigenfrequency of the eccentric mode of an accretion disk. *PASJ*, 45:595–604.
- Howell, S. B., De Young, J., Mattei, J. A., Foster, G., Szkody, P., Cannizzo, J. K., Walker, G., and Fierce, E. (1996). Superoutburst photometry of AL Comae Berenices. *AJ*, 111:2367–2378.

- Hutchings, J. B., Crampton, D., Cowley, A. P., Thorstensen, J. R., and Charles, P. A. (1981). Spectroscopy of 2A 0526–328 – a triple periodic cataclysmic variable. *ApJ*, 249:680–686.
- Iida, M. (1994). *VSOLJ Variable Star Bull.*, 19:2.
- Imada, A., Kato, T., Kubota, K., Uemura, M., Ishioka, R., Kiyota, S., Kinugasa, K., Maehara, H., Nakajima, K., Monard, L. A. G. B., Starkey, D. R., Oksanen, A., and Nogami, D. (2006). The 2003/2004 superoutburst of SDSS J013701.06–091234.9. *PASJ*, 58:143–152.
- Imada, A., Kato, T., Monard, L. A. G. B., Stubbings, R., Uemura, M., Ishioka, R., and Nogami, D. (2008). Photometric studies of new southern SU UMa-type dwarf novae, FL Trianguli Australis and CTCV J0549–4921. *PASJ*, 60:267–273.
- Imada, A. and Monard, L. A. G. B. (2006). Discovery of a Promising Candidate of WZ Sge-Type Dwarf Novae, ASAS 160048–;4846.2: Evidence for Double-Peaked Humps. *PASJ*, 58:L19–L22.
- Ishioka, R., Uemura, M., Matsumoto, K., Ohashi, H., Kato, T., Masi, G., Novak, R., Pietz, J., Martin, B., Starkey, D., Kiyota, S., Oksanen, A., Moilanen, M., Cook, L., Kral, L., Hynek, T., Kolasa, M., Vanmunster, T., Richmond, M., Kern, J., Davis, S., Crabtree, D., Beaulieu, K., Davis, T., Aggleton, M., Gazeas, K., Niarchos, P., Yushchenko, A., Mallia, F., Fiaschi, M., Good, G. A., Boyd, D., Sano, Y., Morikawa, K., Moriyama, M., Mennickent, R., Arenas, J., Ohshima, T., and Watanabe, T. (2002). First detection of the growing humps at the rapidly rising stage of dwarf novae AL Com and WZ Sge. *A&A*, 381:L41–L44.
- Kato, T. (1997). The 1993 superoutburst of T Leonis: Early appearance of superhumps during a precursor outburst. *PASJ*, 49:583–587.
- Kato, T. (2002). on the origin of early superhumps in WZ Sge-type stars. *PASJ*, 54:L11–L14.
- Kato, T. (2003). CK Vul as a candidate eruptive stellar merging event. *A&A*, 399:695.
- Kato, T., Bolt, G., Nelson, P., Monard, B., Stubbings, R., Pearce, A., Yamaoka, H., and Richards, T. (2003). Photometric study of new southern SU UMa-type dwarf novae and candidates – II: Authentication of BF Ara as a normal SU UMa-type dwarf nova with the shortest supercycle. *MNRAS*, 341:901–908.

Kato, T., Hambsch, F.-J., Maehara, H., Masi, G., Miller, I., Noguchi, R., Akasaka, C., Aoki, T., Kobayashi, H., Matsumoto, K., Nakagawa, S., Nakazato, T., Nomoto, T., Ogura, K., Ono, R., Taniuchi, K., Stein, W., Henden, A., de Miguel, E., Kiyota, S., Dubovsky, P. A., Kudzej, I., Imamura, K., Akazawa, H., Takagi, R., Wakabayashi, Y., Ogi, M., Tanabe, K., Ulowetz, J., Morelle, E., Pickard, R. D., Ohshima, T., Kasai, K., Pavlenko, E. P., Antonyuk, O. I., Baklanov, A. V., Antonyuk, K., Samsonov, D., Pit, N., Sosnovskij, A., Littlefield, C., Sabo, R., Ruiz, J., Krajci, T., Dvorak, S., Oksanen, A., Hirosawa, K., Goff, W. N., Monard, B., Shears, J., Boyd, D., Voloshina, I. B., Shugarov, S. Y., Chochol, D., Miyashita, A., Pietz, J., Katysheva, N., Itoh, H., Bolt, G., Andreev, M. V., Parakhin, N., Malanushenko, V., Martinelli, F., Denisenko, D., Stockdale, C., Starr, P., Simonson, M., Tristram, P. J., Fukui, A., Tordai, T., Fidrich, R., Paxson, K. B., Itagaki, K.-i., Nakashima, Y., Yoshida, S., Nishimura, H., Kryachko, T. V., Samokhvalov, A. V., Korotkiy, S. A., Satovski, B. L., Stubbings, R., Poyner, G., Muylleert, E., Gerke, V., MacDonald, II, W., Linnolt, M., Maeda, Y., and Hautecler, H. (2013a). Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. IV: The fourth year (2011–2012). *PASJ*, 65:23.

Kato, T., Hambsch, F.-J., Maehara, H., Masi, G., Nocentini, F., Dubovsky, P. A., Kudzej, I., Imamura, K., Ogi, M., Tanabe, K., Akazawa, H., Krajci, T., Miller, I., Miguel, E. d., Henden, A., Littlefield, C., Noguchi, R., Ishibashi, T., Ono, R., Kawabata, M., Kobayashi, H., Sakai, D., Nishino, H., Furukawa, H., Matsumoto, K., Matsumoto, K., Ohshima, T., Nakata, C., Honda, S., Kinugasa, K., Hashimoto, O., Stein, W., Pickard, R. D., Kiyota, S., Pavlenko, E. P., Antonyuk, O. I., Baklanov, A. V., Antonyuk, K., Samsonov, D., Pit, N., Sosnovskij, A., Oksanen, A., Harlinton, C., Tyyskä, J., Monard, B., Shugarov, S. Y., Chochol, D., Kasai, K., Maeda, Y., Hirosawa, K., Itoh, H., Sabo, R., Ulowetz, J., Morelle, E., Michel, R., Suárez, G., James, N., Dvorak, S., Voloshina, I. B., Richmond, M., Staels, B., Boyd, D., Andreev, M. V., Parakhin, N., Katysheva, N., Miyashita, A., Nakajima, K., Bolt, G., Padovan, S., Nelson, P., Starkey, D. R., Buczynski, D., Starr, P., Goff, W. N., Denisenko, D., Kochanek, C. S., Shappee, B., Stanek, K. Z., Prieto, J. L., Itagaki, K., Kaneko, S., Stubbings, R., Muylleert, E., Shears, J., Schmeer, P., Poyner, G., and Marco, M. R. (2013b). Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. V: The fifth year (2012–2013). *PASJ*, in press(arXiv/1310.7069).

Kato, T., Imada, A., Uemura, M., Nogami, D., Maehara, H., Ishioka, R., Baba, H., Matsumoto, K., Iwamatsu, H., Kubota, K., Sugiyasu, K., Soejima, Y., Moritani, Y., Ohshima, T., Ohashi, H., Tanaka, J., Sasada, M., Arai, A., Nakajima, K.,



- Kiyota, S., Tanabe, K., Imamura, K., Kunitomi, N., Kunihiro, K., Taguchi, H., Koizumi, M., Yamada, N., Nishi, Y., Kida, M., Tanaka, S., Ueoka, R., Yasui, H., Maruoka, K., Henden, A., Oksanen, A., Moilanen, M., Tikkanen, P., Aho, M., Monard, B., Itoh, H., Dubovsky, P. A., Kudzej, I., Dancikova, R., Vanmunster, T., Pietz, J., Bolt, G., Boyd, D., Nelson, P., Krajci, T., Cook, L. M., Torii, K., Starkey, D. R., Shears, J., Jensen, L., Masi, G., Hynek, T., Novák, R., Kocián, R., Král, L., Kučáková, H., Kolasa, M., Štastný, P., Staels, B., Miller, I., Sano, Y., de Ponthière, P., Miyashita, A., Crawford, T., Brady, S., Santallo, R., Richards, T., Martin, B., Buczynski, D., Richmond, M., Kern, J., Davis, S., Crabtree, D., Beaulieu, K., Davis, T., Aggleton, M., Morelle, E., Pavlenko, E. P., Andreev, M., Baklanov, A., Koppelman, M. D., Billings, G., Urbancok, L., Ögmen, Y., Heathcote, B., Gomez, T. L., Voloshina, I., Retter, A., Mularczyk, K., Zoczewski, K., Olech, A., Kedzierski, P., Pickard, R. D., Stockdale, C., Virtanen, J., Morikawa, K., Hambsch, F., Garradd, G., Gualdoni, C., Geary, K., Omodaka, T., Sakai, N., Michel, R., Cárdenas, A. A., Gazeas, K. D., Niarchos, P. G., Yushchenko, A. V., Mallia, F., Fiaschi, M., Good, G. A., Walker, S., James, N., Douzu, K., Julian, II, W. M., Butterworth, N. D., Shugarov, S. Y., Volkov, I., Chochol, D., Katysheva, N., Rosenbush, A. E., Khramtsova, M., Kehusmaa, P., Reszelski, M., Bedient, J., Liller, W., Pojmanski, G., Simonsen, M., Stubbings, R., Schmeer, P., Muyliaert, E., Kinnunen, T., Poyner, G., Ripero, J., and Kriebel, W. (2009). Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. *PASJ*, 61:S395–S616.
- Kato, T., Ishioka, R., and Uemura, M. (2002). Dramatic changes in the outburst properties in V503 Cygni. *PASJ*, 54:1029–1032.
- Kato, T. and Kunjaya, C. (1995). Discovery of a peculiar SU UMa-type dwarf nova ER Ursae Majoris. *PASJ*, 47:163–168.
- Kato, T. and Maehara, H. (2013). Analysis of Kepler light curve of the novalike cataclysmic variable KIC 8751494. *PASJ*, 65:76.
- Kato, T., Maehara, H., Miller, I., Ohshima, T., de Miguel, E., Tanabe, K., Imamura, K., Akazawa, H., Kunitomi, N., Takagi, R., Nose, M., Hambsch, F.-J., Kiyota, S., Pavlenko, E. P., Baklanov, A. V., Antonyuk, O. I., Samsonov, D., Sosnovskij, A., Antonyuk, K., Andreev, M. V., Morelle, E., Dubovsky, P. A., Kudzej, I., Oksanen, A., Masi, G., Krajci, T., Pickard, R. D., Sabo, R., Itoh, H., Stein, W., Dvorak, S., Henden, A., Nakagawa, S., Noguchi, R., Iino, E., Matsumoto, K., Nishitani, H., Aoki, T., Kobayashi, H., Akasaka, C., Bolt, G., Shears, J., Ruiz,

- J., Shugarov, S. Yu., Chochol, D., Parakhin, N. A., Monard, B., Shiokawa, K., Kasai, K., Staels, B., Miyashita, A., Starkey, D. R., Ogmen, Y., Littlefield, C., Katysheva, N., Sergey, I. M., Denisenko, D., Tordai, T., Fidrich, R., Goranskij, V. P., Virtanen, J., Crawford, T., Pietz, J., Koff, R. A., Boyd, D., Brady, S., James, N., Goff, W. N., Itagaki, K., Nishimura, H., Nakashima, Y., Yoshida, S., Stubbings, R., Poyner, G., Maeda, Y., Korotkiy, S., Sokolovsky, K. V., and Ueda, S. (2012a). Survey of period variations of superhumps in SU UMa-type dwarf novae. III. the third year (2010–2011). *PASJ*, 64:21.
- Kato, T., Maehara, H., and Uemura, M. (2012b). Characterization of dwarf novae using SDSS colors. *PASJ*, 64:62.
- Kato, T., Maehara, H., Uemura, M., Henden, A., Miguel, E. D., Miller, I., Dubovsky, P. A., Kudzej, I., Kiyota, S., Hambsch, F., Tanabe, K., Imamura, K., Kunitomi, N., Takagi, R., Nose, M., Akazawa, H., Masi, G., Nakagawa, S., Iino, E., Noguchi, R., Matsumoto, K., Fujii, D., Kobayashi, H., Ogura, K., Ohtomo, S., Yamashita, K., Yanagisawa, H., Itoh, H., Bolt, G., Monard, B., Ohshima, T., Shears, J., Ruiz, J., Imada, A., Oksanen, A., Nelson, P., Gomez, T. L., Staels, B., Boyd, D., Voloshina, I. B., Krajci, T., Crawford, T., Stockdale, C., Richmond, M., Morelle, E., Novák, R., Nogami, D., Ishioka, R., Brady, S., Simonsen, M., Pavlenko, E. P., Ringwald, F. A., Kuramoto, T., Miyashita, A., Pickard, R. D., Hynek, T., Dvorak, S., Stubbings, R., and Muyliaert, E. (2010). Survey of Period Variations of Superhumps in SU UMa-Type Dwarf Novae. II The Second Year (2009–2010). *PASJ*, 62:1525–1584.
- Kato, T., Nogami, D., Baba, H., and Matsumoto, K. (1998). Photometric observations during superoutburst. In Howell, S., Kuulkers, E., and Woodward, C., editors, *ASP Conf. Ser. 137, Wild Stars in the Old West*, page 9. San Francisco: ASP.
- Kato, T., Nogami, D., and Masuda, S. (1996). Large-amplitude superhumps in ER Ursae Majoris during the earliest stage of a superoutburst. *PASJ*, 48:L5–L7.
- Kato, T., Nogami, D., and Masuda, S. (2003). Unusual phase reversal of superhumps in ER Ursae Majoris. *PASJ*, 55:L7–L10.
- Kato, T. and Osaki, Y. (2013a). analysis of three SU UMa-type dwarf novae in the Kepler field. *PASJ*, 65:97.
- Kato, T. and Osaki, Y. (2013b). new method to estimate binary mass ratios by using superhumps. *PASJ*, 65:115.

- Kato, T. and Osaki, Y. (2013c). KIC 7524178 – an SU UMa-type dwarf nova showing predominantly negative superhumps throughout supercycle. *PASJ*, 65:L13.
- Kato, T., Sekine, Y., and Hirata, R. (2001). HV Vir and WZ Sge-type dwarf novae. *PASJ*, 53:1191–1210.
- Kato, T. and Uemura, M. (2012). Period analysis using the Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (Lasso). *PASJ*, 64:122.
- Kato, T., Uemura, M., Ishioka, R., Nogami, D., Kunjaya, C., Baba, H., and Yamaoka, H. (2004). Variable Star Network: World center for transient object astronomy and variable stars. *PASJ*, 56:S1–S54.
- Katz, J. I. (1973). Thirty-five-day periodicity in Her X-1. *Nature Physical Science*, 246:87–89.
- Kemp, J., Patterson, J., de Miguel, E., Roberts, G., Campbell, T., Hambsch, F.-J., Krajci, T., Dvorak, S., Koff, R. A., Morell, E., Potter, M., Cejudo, D., Ulowetz, J., Boyd, D., Sabo, R., Rock, J., and Oksanen, A. (2012). BK Lyncis: The oldest old nova? or: Archaeo-astronomy 101. In Warner, B. D. and et al., editors, *Proc. 31st Annu. Conf., Symp. on Telescope Science*, pages 7–15. Rancho Cucamonga, CA: Society for Astronomical Sciences.
- King, A. R., Schenker, K., and Hameury, J. M. (2002). Blunting the spike: the cataclysmic variable minimum period. *MNRAS*, 335:513.
- Kjurkchieva, D. and Marchev, D. (2010). Large-amplitude modulations of the cataclysmic star ER UMa. *Publ. de l’Observatoire Astronomique de Beograd*, 90:147–150.
- Kley, W., Papaloizou, J. C. B., and Ogilvie, G. I. (2008). Simulations of eccentric disks in close binary systems. *A&A*, 487:671–687.
- Knigge, C., Baraffe, I., and Patterson, J. (2011). The Evolution of Cataclysmic Variables as Revealed by Their Donor Stars. *ApJS*, 194:28.
- Koch, D. G., Borucki, W. J., Basri, G., Batalha, N. M., Brown, T. M., Caldwell, D., Christensen-Dalsgaard, J., Cochran, W. D., DeVore, E., Dunham, E. W., Gautier, T. N., Geary, J. C., Gilliland, R. L., Gould, A., Jenkins, J., Kondo, Y., Latham, D. W., Lissauer, J. J., Marcy, G., Monet, D., Sasselov, D., Boss, A., Brownlee, D., Caldwell, J., Dupree, A. K., Howell, S. B., Kjeldsen, H., Meibom,

- S., Morrison, D., Owen, T., Reitsema, H., Tarter, J., Bryson, S. T., Dotson, J. L., Gazis, P., Haas, M. R., Kolodziejczak, J., Rowe, J. F., Van Cleve, J. E., Allen, C., Chandrasekaran, H., Clarke, B. D., Li, J., Quintana, E. V., Tenenbaum, P., Twicken, J. D., and Wu, H. (2010). Kepler mission design, realized photometric performance, and early science. *ApJ*, 713:L79–L86.
- Kondo, Y., Wolff, C. L., and van Flandern, T. C. (1983). On the clock mechanism and the implausibility of the 35 day precessing disk in HZ Herculis/Hercules X-1. *ApJ*, 273:716–721.
- Kornet, K. and Rozyczka, M. (2000). Hydrodynamical models of accretion disks in SU UMa systems. *Acta Astron.*, 50:163–175.
- Krzeminski, W. and Vogt, N. (1985). The eclipsing dwarf nova OY Carinae. III – photometry during the superoutburst of January 1980. *A&A*, 144:124–132.
- Kuulkers, E., van Amerongen, S., van Paradijs, J., and Rottgering, H. (1991). Walraven observations of the April 1987 superoutburst of the eclipsing dwarf nova Z Chamaeleontis. *A&A*, 252:605–617.
- Leibowitz, E. M., Mendelson, H., Bruch, A., Duerbeck, H. W., Seitter, W. C., and Richter, G. A. (1994). The 1992 outburst of the SU Ursae Majoris-type dwarf nova HV Virginis. *ApJ*, 421:771–778.
- Lemm, K., Patterson, J., Thomas, G., and Skillman, D. R. (1993). Superhumps in cataclysmic variables: I. T Leonis. *PASP*, 105:1120–1126.
- Lubow, S. H. (1991). a model for tidally driven eccentric instabilities in fluid disks. *ApJ*, 381:259–267.
- Lubow, S. H. (1992a). Dynamics of eccentric disks with application to superhump binaries. *ApJ*, 401:317–324.
- Lubow, S. H. (1992b). Tidally driven inclination instability in Keplerian disks. *ApJ*, 398:525–530.
- Lubow, S. H. (2010). Eccentricity growth rates of tidally distorted discs. *MNRAS*, 406:2777–2786.
- Lubow, S. H., Pringle, J. E., and Kerswell, R. R. (1993). Tidal instability of accretion disks. *ApJ*, 419:758.

- Lubow, S. H. and Shu, F. H. (1975). Gas dynamics of semidetached binaries. *ApJ*, 198:383–405.
- Matsumoto, K., Nogami, D., Kato, T., and Baba, H. (1998). ‘Huruhata’s Variable’ revealed: The WZ Sge-type dwarf nova EG Cancri. *PASJ*, 50:405–409.
- Mauche, C. W. and Raymond, J. C. (2000). Extreme Ultraviolet Explorer observations of OY Carinae in superoutburst. *ApJ*, 541:924–936.
- Montgomery, M. M. (2012). Numerical simulations of naturally tilted, retrogradely precessing, nodal superhumping accretion disks. *ApJ*, 745:L25.
- Montgomery, M. M. and Bisikalo, D. V. (2010). Accretion discs with an inner spiral density wave. *MNRAS*, 405:1397–1408.
- Montgomery, M. M. and Martin, E. L. (2010). A common source of accretion disk tilt. *ApJ*, 722:989–996.
- Motch, C. (1981). A photometric study of 2a 0526-328. *A&A*, 100:277.
- Murray, C. D. and Dermott, S. F. (1999). *Solar system dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Murray, J., Warner, B., and Wickramasinghe, D. (2000). Superhumps in systems with intermediate mass ratios. *New Astron. Rev.*, 44:51–56.
- Murray, J. R. (1998). Simulations of superhumps and superoutbursts. *MNRAS*, 297:323–333.
- Murray, J. R. (2000). The precession of eccentric discs in close binaries. *MNRAS*, 314:L1–L5.
- Murray, J. R. and Armitage, P. J. (1998). Tilted accretion discs in cataclysmic variables: tidal instabilities and superhumps. *MNRAS*, 300:561–566.
- Murray, J. R., Chakrabarty, D., Wynn, G. A., and Kramer, L. (2002). Magnetically warped discs in close binaries. *MNRAS*, 335:247.
- Nakata, C., Ohshima, T., Kato, T., Nogami, D., Masi, G., de Miguel, E., Ulowetz, J., Littlefield, C., Goff, W. N., Krajci, J., Maehara, H., Stein, W., Sabo, R., Noguchi, R., Ono, R., Kawabata, M., Furukawa, H., Matsumoto, K., Ishibashi, T., Dubovsky, P. A., Kudzej, I., Dvorak, S., Hambsch, F. J., Pickard, R. D.,

- Morelle, E., Muyliaert, E., Padovan, S., and Henden, A. (2013). WZ Sge-type dwarf novae with multiple rebrightenings: MASTER OT J211258.65+242145.4 and MASTER OT J203749.39+552210.3. *PASJ*, 65:117.
- Nogami, D., Baba, H., Kato, T., and Novák, R. (1998). Photometry of SW Ursae Majoris during the 1996 superoutburst. *PASJ*, 50:297–302.
- Nogami, D., Kato, T., Baba, H., Matsumoto, K., Arimoto, J., Tanabe, K., and Ishikawa, K. (1997). The 1995 superoutburst of the WZ Sagittae-type dwarf nova AL Comae Berenices. *ApJ*, 490:840–846.
- Nogami, D., Kato, T., Masuda, S., and Hirata, R. (1995). Discovery of the second PG 0943+521-type dwarf nova V1159 Ori. *IBVS*, 4155.
- Oizumi, S., Omodaka, T., Yamamoto, H., Tanada, S., Yasuda, T., Arao, Y., Kodama, K., Suzuki, M., Matsuo, T., Maehara, H., Nakajima, K., Dubovsky, P. A., Kato, T., Imada, A., Kubota, K., Sugiyasu, K., Morikawa, K., Torii, K., Uemura, M., Ishioka, R., Tanabe, K., and Nogami, D. (2007). Long-term monitoring of the short period SU UMa-type dwarf nova, V844 Herculis. *PASJ*, 59:643–651.
- Olech, A. (1997). V485 centauri: the shortest period su uma star. *Acta Astron.*, 47:281.
- Olech, A. (2002). Nova v1974 cyg - results of the 1997 campaign. *Acta Astron.*, 52:273.
- Olech, A., Rutkowski, A., and Schwarzenberg-Czerny, A. (2007). Curious variables experiment (CURVE). three periodicities of BF Ara. *Acta Astron.*, 57:331–345.
- Olech, A., Rutkowski, A., and Schwarzenberg-Czerny, A. (2009). Curious Variables Experiment: SDSS J210014.12+004446.0 – dwarf nova with negative and positive superhumps. *MNRAS*, 399:465–473.
- Osaki, Y. (1974). An accretion model for the outbursts of U Geminorum stars. *PASJ*, 26:429–436.
- Osaki, Y. (1985). Irradiation-induced mass-overflow instability as a possible cause of superoutbursts in SU UMa stars. *A&A*, 144:369–380.
- Osaki, Y. (1989). A model for the superoutburst phenomenon of SU Ursae Majoris stars. *PASJ*, 41:1005–1033.

- Osaki, Y. (1995). a model for WZ Sagittae-type dwarf novae: SU UMa/WZ Sge connection. *PASJ*, 47:47–58.
- Osaki, Y. and Kato, T. (2013a). the cause of the superoutburst in SU UMa stars is finally revealed by Kepler light curve of V1504 Cygni. *PASJ*, 65:50.
- Osaki, Y. and Kato, T. (2013b). study of superoutbursts and superhumps in SU UMa stars by the Kepler light curves of V344 Lyrae and V1504 Cygni. *PASJ*, 65:95.
- Osaki, Y. and Kato, T. (2014). a further study of superoutbursts and superhumps in SU UMa stars by the Kepler light curves of V1504 Cygni and V344 Lyrae. *PASJ*, in press(arXiv/1309.3722).
- Osaki, Y. and Meyer, F. (2002). Early humps in WZ Sge stars. *A&A*, 383:574–579.
- Osaki, Y. and Meyer, F. (2003). Is evidence for enhanced mass transfer during dwarf-nova outbursts well substantiated? *A&A*, 401:325–337.
- Osaki, Y., Shimizu, S., and Tsugawa, M. (1997). Repetitive rebrightening in the dwarf nova EG Cancr. *PASJ*, 49:L19–L23.
- Paczynski, B. (1981). Evolution of cataclysmic binaries. *Acta Astron.*, 31:1–12.
- Papaloizou, J. C. B. and Terquem, C. (1995). On the dynamics of tilted discs around young stars. *MNRAS*, 274:987–1001.
- Patterson, J. (1995). Superhumps in cataclysmic binaries. VI. H 0551-819. *PASP*, 107:657.
- Patterson, J. (1998). Late evolution of cataclysmic variables. *PASP*, 110:1132–1147.
- Patterson, J. (1999). Permanent superhumps in cataclysmic variables. In Mineshige, S. and Wheeler, J. C., editors, *Disk Instabilities in Close Binary Systems*, page 61. Tokyo: Universal Academy Press.
- Patterson, J. (2001). Accretion-disk precession and substellar secondaries in cataclysmic variables. *PASP*, 113:736–747.
- Patterson, J., Augusteijn, T., Harvey, D. A., Skillman, D. R., Abbott, T. M. C., and Thorstensen, J. (1996). Superhumps in cataclysmic binaries. IX. AL Comae Berenices. *PASP*, 108:748–761.

- Patterson, J., Bond, H. E., Grauer, A. D., Shafter, A. W., and Mattei, J. A. (1993a). Superhumps in VY Aquarii. *PASP*, 105:69–77.
- Patterson, J., Jablonski, F., Koen, C., O’Donoghue, D., and Skillman, D. R. (1995). Superhumps in cataclysmic binaries. VIII. V1159 Orionis. *PASP*, 107:1183–1200.
- Patterson, J., Kemp, J., Harvey, D. A., Fried, R. E., Rea, R., Monard, B., Cook, L. M., Skillman, D. R., Vanmunster, T., Bolt, G., Armstrong, E., McCormick, J., Krajci, T., Jensen, L., Gunn, J., Butterworth, N., Foote, J., Bos, M., Masi, G., and Warhurst, P. (2005). Superhumps in cataclysmic binaries. XXV.  $q_{\text{crit}}$ ,  $\epsilon(q)$ , and mass-radius. *PASP*, 117:1204–1222.
- Patterson, J., Kemp, J., Saad, J., Skillman, D. R., Harvey, D., Fried, R., Thorstensen, J. R., and Ashley, R. (1997). Superhumps in cataclysmic binaries. XI. V603 Aquilae revisited. *PASP*, 109:468–476.
- Patterson, J., Kemp, J., Skillman, D. R., Harvey, D. A., Shafter, A. W., Vanmunster, T., Jensen, L., Fried, R., Kiyota, S., Thorstensen, J. R., and Taylor, C. J. (1998). Superhumps in cataclysmic binaries. XV. EG Cancri, king of the echo outbursts. *PASP*, 110:1290–1303.
- Patterson, J., McGraw, J. T., Coleman, L., and Africano, J. L. (1981). A photometric study of the dwarf nova WZ Sagittae in outburst. *ApJ*, 248:1067–1075.
- Patterson, J., Thomas, G., Skillman, D. R., and Diaz, M. (1993b). The 1991 V603 Aquilae campaign – superhumps and  $p$ -dots. *ApJS*, 86:235–254.
- Patterson, J., Uthas, H., Kemp, J., de Miguel, E., Krajci, T., Foote, J., Hambsch, F.-J., Campbell, T., Roberts, G., Cejudo, D., Dvorak, S., Vanmunster, T., Koff, R., Skillman, D., Harvey, D., Martin, B., Rock, J., Boyd, D., Oksanen, A., Morelle, E., Ulowetz, J., Kroes, A., Sabo, R., and Jensen, L. (2013). BK Lyncis: the oldest old nova and a bellwether for cataclysmic variable evolution. *MNRAS*, 434:1902–1919.
- Pavlenko, E. P., Voloshina, I. B., Andreev, M. V., Shugarov, S. Y., Baklanov, A. V., Antonyuk, O. I., Parakhin, N. A., Samsonov, D. A., and Metlov, V. G. (2010). The dwarf nova MN Dra: Periodic processes at various phases of the supercycle. *Astron. Rep.*, 54:6–16.
- Pearson, K. J. (2006). Superhumps: confronting theory with observation. *MNRAS*, 371:235–244.



- Pojmański, G. (2002). The all sky automated survey. catalog of variable stars. i. 0 h - 6 h quarter of the southern hemisphere. *Acta Astron.*, 52:397–427.
- Pringle, J. E. (1996). Self-induced warping of accretion discs. *MNRAS*, 281:357–361.
- Pringle, J. E., Bateson, F. M., Hassall, B. J. M., Heise, J., van der Woerd, H., Holberg, J. B., Polidan, R. S., van Amerongen, S., van Paradijs, J., and Verbunt, F. (1987). Multiwavelength monitoring of the dwarf nova vw hydri. i - overview. *MNRAS*, 225:73.
- Quillen, A. C. (2001). A Wind-driven Warping Instability in Accretion Disks. *ApJ*, 563:313–318.
- Retter, A., Chou, Y., and T., B. (2002). Detection of negative superhumps in a lmxrb – an end to the long debate on the nature of v1405 aql (x 1916-053). In Gänsicke, B. T., Beuermann, K., and Reinsch, K., editors, *ASP Conf. Ser. 261, The Physics of Cataclysmic Variables and Related Objects*, page 527. San Francisco: ASP.
- Retter, A., Hellier, C., Augusteijn, T., Naylor, T., Bedding, T. R., Bembrick, C., McCormick, J., and Velthuis, F. (2003). A 6.3-h superhump in the cataclysmic variable tv columbae: the longest yet seen. *MNRAS*, 340:679.
- Ringwald, F. A., Thorstensen, J. R., Honeycutt, R. K., and Robertson, J. W. (1996). The orbital period of BK Lyncis (PG 0917+342). *MNRAS*, 278:125–131.
- Ringwald, F. A., Velasco, K., Roveto, J. J., and Meyers, M. E. (2012). The orbital period and negative superhumps of the nova-like cataclysmic variable V378 Pegasi. *New Astron.*, 17:433–437.
- Ritter, H. (1984). Catalogue of cataclysmic binaries, low-mass X-ray binaries and related objects (third edition). *A&AS*, 57:385–418.
- Ritter, H. and Kolb, U. (2003). Catalogue of cataclysmic binaries, low-mass x-ray binaries and related objects (seventh edition). *A&A*, 404:301.
- Schoembs, R. (1986). The eclipsing dwarf nova OY Carinae. IV – photometry of advanced stages of a superoutburst. *A&A*, 158:233–246.
- Schreiber, M. R., Hameury, J.-M., and Lasota, J.-P. (2004). Delays in dwarf novae II: VW Hyi, the tidal instability and enhanced mass transfer models. *A&A*, 427:621–635.

- Semeniuk, I. (1980). Photometry of V436 Centauri during superoutburst in May 1978. *A&AS*, 39:29–33.
- Semeniuk, I., Olech, A., Kwast, T., and Nalezyty, M. (1997). CCD photometry of SW Ursae Majoris during the 1996 superoutburst. *Acta Astron.*, 47:201–209.
- Semeniuk, I., Schwarzenberg-Czerny, A., Duerbeck, H., Hoffmann, M., and Smak, J. (1987a). Photometry of TT Arietis. *Ap&SS*, 130:167–174.
- Semeniuk, I., Schwarzenberg-Czerny, A., Duerbeck, H., Hoffmann, M., Smak, J., Stepień, K., and Tremko, J. (1987b). Four periods of TT Arietis. *Acta Astron.*, 37:197–212.
- Shappee, B. J., Prieto, J. L., Grupe, D., Kochanek, C. S., Stanek, K. Z., De Rosa, G., Mathur, S., Zu, Y., Peterson, B. M., Pogge, R. W., Komossa, S., Im, M., Jencson, J., W-S. Holm, T., Basu, U., Beacom, J. F., Szczygiel, D. M., Brimacombe, J., Adams, S., Campillay, A., Choi, C., Contreras, C., Dietrich, M., Dubberley, M., Elphick, M., Foale, S., Giustini, M., Gonzalez, C., Hawkins, E., Howell, D. A., Hsiao, E. Y., Koss, M., Leighly, K. M., Morrell, N., Mudd, D., Mullins, D., Nugent, J. M., Parrent, J., Phillips, M. M., Pojmanski, G., Rosing, W., Ross, R., Sand, D., Terndrup, D. M., Valenti, S., Walker, Z., and Yoon, Y. (2013). The man behind the curtain: X-rays drive the UV through NIR variability in the 2013 AGN outburst in NGC 2617. *ApJ*, submitted(arXiv/1310.2241).
- Shara, M. M. (1989). Recent progress in understanding the eruptions of classical novae. *PASP*, 101:5.
- Skillman, D. R., Harvey, D. A., Patterson, J., Kemp, J., Jensen, L., Fried, R. E., Garradd, G., Gunn, J., van Zyl, L., Kiyota, S., Retter, A., Vanmunster, T., and Warhurst, P. (1998). Superhumps and accretion disk precession in TT Arietis. *ApJ*, 503:L67–L70.
- Skillman, D. R. and Patterson, J. (1993). Superhumps in cataclysmic binaries. II. PG 0917+342. *ApJ*, 417:298–304.
- Skillman, D. R., Patterson, J., Kemp, J., Harvey, D. A., Fried, R. E., Retter, A., Lipkin, Y., and Vanmunster, T. (1999). Superhumps in cataclysmic binaries. XVII. AM Canum Venaticorum. *PASP*, 111:1281–1291.
- Smak, J. (1984). accretion in cataclysmic binaries. IV – accretion disks in dwarf novae. *Acta Astron.*, 34:161–189.

- Smak, J. (1985). statistical analysis of outbursts and superoutbursts of VW Hydri. *Acta Astron.*, 35:357–367.
- Smak, J. (1994). eclipses in cataclysmic variables with stationary accretion disks. IV. on the peculiar  $T(r)$  distributions. *Acta Astron.*, 44:265–276.
- Smak, J. (2004). irradiation of secondary components and enhanced mass outflow in dwarf novae during outbursts. *Acta Astron.*, 54:181–193.
- Smak, J. (2007). Superoutbursts of Z Chameleontis. detection of the hot spot. *Acta Astron.*, 57:87–101.
- Smak, J. (2008). superoutbursts of Z Cha and their interpretation. *Acta Astron.*, 58:55–64.
- Smak, J. (2009a). are disks in dwarf novae during their superoutbursts really eccentric? *Acta Astron.*, 59:89–101.
- Smak, J. (2009b). on the origin of tilted disks and negative superhumps. *Acta Astron.*, 59:419–430.
- Smak, J. (2013). on the nature of superhumps. *Acta Astron.*, 63:369–377.
- Smak, J. I. (1991). On the models for superoutbursts in dwarf novae of the SU UMa type. *Acta Astron.*, 41:269.
- Smak, J. I. (2000). Dwarf nova outbursts. IV. absolute magnitudes at maximum. *Acta Astron.*, 50:399.
- Smith, A. J., Haswell, C. A., Murray, J. R., Truss, M. R., and Foulkes, S. B. (2007a). Comprehensive simulations of superhumps. *MNRAS*, 378:785–800.
- Smith, A. J., Haswell, C. A., Murray, J. R., Truss, M. R., and Foulkes, S. B. (2007b). Comprehensive simulations of superhumps. *MNRAS*, 378:785–800.
- Soejima, Y., Imada, A., Nogami, D., Kato, T., and Monard, L. A. G. (2009). Photometric studies of a WZ Sge-type dwarf nova candidate, ASAS 160048–4846.2. *PASJ*, 61:395–401.
- Stanishev, V., Kraicheva, Z., Boffin, H. M. J., and Genkov, V. (2002). PX Andromedae: Superhumps and variable eclipse depth. *A&A*, 394:625–632.

- Stanishev, V., Kraicheva, Z., Boffin, H. M. J., Genkov, V., Papadaki, C., and Carpano, S. (2004). Accretion disc evolution in DW Ursae Majoris: A photometric study. *A&A*, 416:1057–1067.
- Stehle, R. (1999). Hydrodynamic simulations of cataclysmic variable accretion discs in outburst. *MNRAS*, 304:687–697.
- Stellingwerf, R. F. (1978). Period determination using phase dispersion minimization. *ApJ*, 224:953–960.
- Still, M., Howell, S. B., Wood, M. A., Cannizzo, J. K., and Smale, A. P. (2010). Quiescent Superhumps Detected in the Dwarf Nova V344 Lyrae by Kepler. *ApJ*, 717:L113–L117.
- Stolz, B. and Schoembs, R. (1981). TU Men, the first SU UMa star beyond the gap. *IBVS*, 2029.
- Szkody, P., Anderson, S. F., Agüeros, M., Covarrubias, R., Bentz, M., Hawley, S., Margon, B., Voges, W., Henden, A., Knapp, G. R., Vanden Berk, D. E., Rest, A., Miknaitis, G., Magnier, E., Brinkmann, J., Csabai, I., Harvanek, M., Hindsley, R., Hennessy, G., Ivezić, Z., Kleinman, S. J., Lamb, D. Q., Long, D., Newman, P. R., Nielsen, E. H., Nichol, R. C., Nitta, A., Schneider, D. P., Snedden, S. A., and York, D. G. (2002). Cataclysmic variables from the Sloan Digital Sky Survey. I. the first results. *AJ*, 123:430–442.
- Szkody, P., Anderson, S. F., Brooks, K., Gänsicke, B. T., Kronberg, M., Riecken, T., Ross, N. P., Schmidt, G. D., Schneider, D. P., Agüeros, M. A., Gomez-Moran, A. N., Knapp, G. R., Schreiber, M. R., and Schwöpe, A. D. (2011). Cataclysmic variables from the Sloan Digital Sky Survey. VIII. the final year (2007–2008). *AJ*, 142:181.
- Szkody, P., Anderson, S. F., Hayden, M., Kronberg, M., McGurk, R., Riecken, T., Schmidt, G. D., West, A. A., Gänsicke, B. T., Nebot Gomez-Moran, A., Schneider, D. P., Schreiber, M. R., and Schwöpe, A. D. (2009). Cataclysmic variables from SDSS. VII. the seventh year (2006). *AJ*, 137:4011–4019.
- Szkody, P., Fraser, O., Silvestri, N., Henden, A., Anderson, S. F., Frith, J., Lawton, B., Owens, E., Raymond, S., Schmidt, G., Wolfe, M., Bochanski, J., Covey, K., Harris, H., Hawley, S., Knapp, G. R., Margon, B., Voges, W., Walkowicz, L., Brinkmann, J., and Lamb, D. Q. (2003). Cataclysmic Variables from the Sloan Digital Sky Survey. II. The Second Year. *AJ*, 126:1499–1514.

- Szkody, P., Henden, A., Agüeros, M., Anderson, S. F., Bochanski, J. J., Knapp, G. R., Mannikko, L., Mukadam, A., Silvestri, N. M., Schmidt, G. D., Stephanik, B., Watson, T. K., West, A. A., Winget, D., Wolfe, M. A., Barentine, J. C., Brinkmann, J., Brewington, H. J., Downes, R. A., Harvanek, M., Kleinman, S. J., Krzesinski, J., Long, D., Neilsen, E. H., Nitta, A., Schneider, D. P., Snedden, S. A., and Voges, W. (2006). Cataclysmic variables from Sloan Digital Sky Survey. V. the fifth year (2004). *AJ*, 131:973–983.
- Szkody, P., Henden, A., Fraser, O., Silvestri, N., Bochanski, J., Wolfe, M. A., Agüeros, M., Warner, B., Woudt, P., Trampusch, J., Homer, L., Schmidt, G., Knapp, G. R., Anderson, S. F., Covey, K., Harris, H., Hawley, S., Schneider, D. P., Voges, W., and Brinkmann, J. (2004). Cataclysmic Variables from the Sloan Digital Sky Survey. III. The Third Year. *AJ*, 128:1882–1893.
- Szkody, P., Henden, A., Fraser, O. J., Silvestri, N. M., Schmidt, G. D., Bochanski, J. J., Wolfe, M. A., Agüeros, M., Anderson, S. F., Mannikko, L., Downes, R. A., Schneider, D. P., and Brinkmann, J. (2005). Cataclysmic variables from Sloan Digital Sky Survey. IV. the fourth year (2003). *AJ*, 129:2386–2399.
- Szkody, P., Henden, A., Mannikko, L., Mukadam, A., Schmidt, G. D., Bochanski, J. J., Agüeros, M., Anderson, S. F., Silvestri, N. M., Dahab, W. E., Oguri, M., Schneider, D. P., Shin, M.-S., Strauss, M. A., Knapp, G. R., and West, A. A. (2007). Cataclysmic Variables from Sloan Digital Sky Survey. VI. The Sixth Year (2005). *AJ*, 134:185–194.
- Templeton, M. R., Leaman, R., Szkody, P., Henden, A., Cook, L., Starkey, D., Oksanen, A., Koppelman, M., Boyd, D., Nelson, P. R., Vanmunster, T., Pickard, R., Quinn, N., Huziak, R., Aho, M., James, R., Golovin, A., Pavlenko, E., Durkee, R. I., Crawford, T. R., Walker, G., and Pääkkönen, P. (2006). The Recently Discovered Dwarf Nova System ASAS J002511+1217.2: A New WZ Sagittae Star. *PASP*, 118:236–245.
- Thorstensen, J. R. and Taylor, C. J. (1997). Orbital periods for the SU UMa-type dwarf novae UV Persei, VY Aquarii, and V1504 Cygni. *PASP*, 109:1359–1363.
- Thorstensen, J. R., Taylor, C. J., Becker, C. M., and Remillard, R. A. (1997). Orbital periods for the unusual dwarf novae *er ursae majoris* and *v1159 orionis*. *PASP*, 109:477.
- Tibshirani, R. (1996). Regression shrinkage and selection via the lasso. *J. R. Statistical Soc. Ser. B*, 58:267.

- Tramposch, J., Homer, L., Szkody, P., Henden, A., Silvestri, N. M., Yirak, K., Fraser, O. J., and Brinkmann, J. (2005). SDSS J210014.12+004446.0: A New Dwarf Nova with Quiescent Superhumps? *PASP*, 117:262–267.
- Udalski, A. (1988). Photometry of cataclysmic variables. II – TT Arietis. *Acta Astron.*, 38:315–327.
- Udalski, A. (1990). SU Ursae Majoris – the perfect prototype of SU UMa subclass of dwarf novae. *AJ*, 100:226–232.
- Uemura, M., Arai, A., Krajci, T., Pavlenko, E., Shugarov, S. Y., Katysheva, N. A., Goranskij, V. P., Maehara, H., Imada, A., Kato, T., Nogami, D., Nakajima, K., Ohsugi, T., Yamashita, T., Kawabata, K. S., Nagae, O., Chiyonobu, S., Fukazawa, Y., Mizuno, T., Katagiri, H., Takahashi, H., Ueda, A., Hayashi, T., Okita, K., Yoshida, M., Yanagisawa, K., Sato, S., Kino, M., and Sadakane, K. (2008). Discovery of a WZ Sge-type dwarf nova, SDSS J102146.44+234926.3: Unprecedented infrared activity during a rebrightening phase. *PASJ*, 60:227–236.
- Uemura, M., Mennickent, R. E., Ishioka, R., Imada, A., Kato, T., Nogami, D., Stubbings, R., Kiyota, S., Nelson, P., Tanabe, K., Heathcote, B., and Bolt, G. (2005). TV Corvi revisited: Precursor and superhump period derivative linked to the disk instability model. *A&A*, 432:261–271.
- van Paradijs, J. (1983). Superoutbursts – a general phenomenon in dwarf novae. *A&A*, 125:L16–L18.
- Verbunt, F. and Zwaan, C. (1981). Magnetic braking in low-mass x-ray binaries. *A&A*, 100:L7.
- Vogt, N. (1974). Photometric study of the dwarf nova VW Hydri. *A&A*, 36:369–378.
- Vogt, N. (1983). VW Hydri revisited – conclusions on dwarf nova outburst models. *A&A*, 118:95–101.
- Warner, B. (1983). V436 cen revisited. *IBVS*, 2397.
- Warner, B. (1995). *Cataclysmic Variable Stars*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Whitehurst, R. (1988). Numerical simulations of accretion disks. i - superhumps - a tidal phenomenon of accretion disks. *MNRAS*, 232:35.

- Wood, M. A. and Burke, C. J. (2007). The physical origin of negative superhumps in cataclysmic variables. *ApJ*, 661:1042–1047.
- Wood, M. A., Montgomery, M. M., and Simpson, J. C. (2000). Smoothed particle hydrodynamics simulations of apsidal and nodal superhumps. *ApJ*, 535:L39.
- Wood, M. A., Still, M. D., Howell, S. B., Cannizzo, J. K., and Smale, A. P. (2011). V344 Lyrae: A touchstone SU UMa cataclysmic variable in the Kepler field. *ApJ*, 741:105.
- Woudt, P. A. and Warner, B. (2002). High-speed photometry of faint cataclysmic variables - ii. rs car, v365 car, v436 car, ap cru, rr cha, bi ori, cm phe and v522 sgr. *MNRAS*, 335:44.
- Woudt, P. A., Warner, B., de Budé, D., Macfarlane, S., Schurch, M. P. E., and Zietsman, E. (2012). High-speed photometry of faint cataclysmic variables - VII. targets selected from the Sloan Digital Sky Survey and the Catalina Real-time Transient Survey. *MNRAS*, 421:2414–2429.
- Woudt, P. A., Warner, B., and Spark, M. (2005). High-speed photometry of faint cataclysmic variables – V. V433 Ara, OQ Car, V591 Cen, V1039 Cen, CAL 86 (Dor), UY Mic, LB 9963 (Oct), V367 Peg, Sgr (MACHO peculiar variable), RX J0403+044 (Tau), V382 Vel and SY Vol. *MNRAS*, 364:107–116.
- Wu, X., Li, Z., Ding, Y., Zhang, Z., and Li, Z. (2002). TT Arietis: Spectroscopy and photometry. *ApJ*, 569:418–422.
- Zemko, P., Kato, T., and Shugarov, S. (2013). Detection of change in supercycles in ER Ursae Majoris. *PASJ*, 65:54.
- Zwitter, T. and Munari, U. (1994). CCD spectrophotometry of CVs. I. 4600–9000Å low resolution atlas for 31 faint systems. *A&AS*, 107:503–514.